

République Algérienne

Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur  
et de la Recherche Scientifique  
**Ecole nationale Polytechnique**



Département de Génie Civil

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
P0007/05A

وزارة التعليم العالي  
و البحث العلمي  
المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات

دائرة الهندسة المدنية

## PROJET DE FIN D'ETUDES

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME  
D'INGENIEUR D'ETAT EN GENIE CIVIL

*Thème*

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
المكتبة — BIBLIOTHEQUE  
Ecole Nationale Polytechnique

***Béton de sable modifié à la  
poudrette de caoutchouc***

Proposé et dirigé par :

Mme R.KETTAB



Réalisé par :

Mr K.HAMADACHE

Promotion: JUIN 2005

*Ecole Nationale Polytechnique 10, Avenue Hassen Badi BP182 El-Harrach  
16200 Alger (Algérie)*

ملخص:

تتمحور هذه الدراسة التجريبية حول تأثير إضافة المسحوق المطاطي بكميات ضئيلة من 1% إلى 4% بخلطة 1% في خرسانة رمل الكثبان، من أجل هذا قمنا بسلسلة تجارب على تركيبين مختلفتين، الأولى خرسانة رمل الكثبان مصبغة بالرمل (0/3)، و الثانية مصبغة بالرمل (0/3) و الحصى (3/8). النتائج أثبتت عدم نجاعة خرسانة رمل الكثبان المغيرة بالمسحوق المطاطي من ناحية المقاومة و ثابتة المرونة إلا أن لها خصائص إيجابية مثل الليونة و التراص.

الكلمات المفتاحية : الخرسانة الرملية، المسحوق المطاطي، المقاومة، الليونة، التراص، ثابتة المرونة.

### Résumé :

Ce travail expérimental a pour but, l'étude de l'influence d'ajout de poudrette de caoutchouc sur le béton de sable de dune. Pour ce faire, on a effectué deux séries d'essais, la première est celle du béton de sable de dunes corrigé par l'ajout de sable concassé (0/3) (non chargé), et la seconde le béton de sable de dunes corrigé par l'ajout de sable concassé (0/3) et le gravillon (3/8) (chargé). Dans chaque série on a introduit la poudrette de caoutchouc de 1% à 4% en pourcentage pondéral, Les résultats obtenus lors de cette étude ont montré la non validité de ces compositions du point de vue résistance et module d'élasticité, mais elles comportent des propriétés positives tel que la maniabilité et la compacité.

Mots clés : béton de sable, poudrette de caoutchouc, résistance, maniabilité, compacité, module d'élasticité.

### Summary:

This experimental study investigates the effects of addition of crumb tyre rubber in sand concrete. For this reasons we had done two experimental on two different formulations, the first is sand concrete corrected with sand (0/3), and the second is sand concrete corrected with sand (0/3) and stone (3/8). The obtained results have shown the invalidity of these formulations concerned resistance and elastic modulus, but they have positive properties like workability and compactness.

Keywords: sand concrete, crumb tyre rubber, resistance, workability, compactness, elastic modulus.



*Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail*

*A mes parents, mes frères et sœurs*

*A mon grand père*

*A madame R. KETTAB*

*A toute l'équipe de laboratoire de l'E.N.G.O.A*

*A mes amis*

*K. HAMADACHE*

## Remerciements

Je remercie madame R.KETTAB qui est à l'origine de ce travail, pour son aide si précieuse et ses conseils éclairés tout au long du travail.

Je rends hommage à tous ceux qui, de près ou de loin, m'ont apporté de l'aide pour l'élaboration de ce travail, en particulier monsieur C.BOUCHELAGHEM, Mohamed, Djelloul (E.N.G.O.A).

J'exprime ma profonde gratitude envers monsieur A.BAHRI pour son aide durant la période d'essais.

Mes remerciements vont également au président du jury ainsi que les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail.

Enfin, je tiens plus que tout, mes remerciements les plus chaleureux à ma chère famille dont l'amour et les encouragements m'ont été d'un apport sans égal.



# SOMMAIRE

## PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE :

### CHAPITRE I : INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale	1
Historique	4

### CHAPITRE II : BETON DE SABLE

II.1. Introduction	6
II.2. Définition	6
II.3. Composition d'un béton de sable	6
II.3.1. Les sables	7
II.3.2. Les ciments	7
II.3.3. Les fines d'ajouts	7
II.3.4. L'eau de gâchage	10
II.3.5. Les adjuvants	10
II.3.6. Autres ajouts	11
II.3.6.1. Les gravillons	11
II.3.6.2. Les fibres	11
II.3.6.3. Les colorants	12
II.3.6.4. la poudrette de caoutchouc	12
II.4. propriétés essentielles du béton de sable	13
II.4.1. Granulométrie et maniabilité	13
II.4.2. Granulométrie et résistance	13
II.4.3. La finesse des additions	13
II.4.4. La nature de fines l'addition	13
II.4.5. L'adhérence aux armatures	13
II.4.6. Durabilité des bétons de sable	14
II.4.7. Résistance au gel et au dégel	14
II.4.8. Phénomène de ségrégation des constituants	15
II.5. Propriétés spécifiques	15
II.5.1. Le retrait	15
II.5.2. Fluage	17
II.5.2.1. Rappel sur les mécanismes de fluage	17
II.5.2.2. Description d'une loi de fluage	18
II.6. Principaux essais sur béton de sable frais	19
II.6.1. Malaxage	19
II.6.2. Serrage des bétons de sable	20
II.6.3. Protection contre la dessiccation	20
II.6.4. La maniabilité	20
II.6.5. Essai de prise	21
II.6.6. Essai sur la masse volumique	22

II.7. Domaine d'emploi des bétons de sable	22
II.7.1. Les bétons non vibrés	22
II.7.2. Les bétons projetés	23
II.7.3. Les travaux d'injection	23
II.7.4. La préfabrication d'éléments destinés à rester apparents	23
II.8. Désignation d'un béton de sable	23
II.10. Les méthodes de formulation	24
II.10.1. Définition	24
II.10.2. Approche théorique d'une formulation d'un béton de sable	24
II.10.2.1. Dosage en fines d'un béton de sable	25
II.10.2.2. Dosage en eau d'un béton de sable	26
II.10.2.3. Dosage en sable	27
II.10.2.4. Estimation de la résistance en compression	27
II.10.3. Approche expérimentale de la formulation d'un béton de sable	31
II.10.3.1. Etape de la formulation	31
II.10.3.1.a. Détermination d'une formule de base sans fines d'addition	31
II.10.3.1.b. Dosage en sable	32
II.10.3.2. Réglage de la maniabilité et du rendement de la formule	32
II.10.3.3. Détermination du dosage en fines d'addition	33
II.10.4. Evaluation de la résistance	34

---

### CHAPITRE III : RESULTATS BIBLIOGRAPHIQUES

---

III.1. Résultats SABLOCRETE	35
III.1.1. Granulométrie et maniabilité	35
III.1.2. Granulométrie et résistance	37
III.1.3. La finesse des fines d'addition	39
III.1.4. La nature de fines l'addition	39
III.1.5. Adhérence aux armatures	40
III.1.6. Durabilité des bétons de sable	41
III.1.7. Les méthodes de formulation	41
III.1.7.1. Dosage en fines d'un béton de sable	41
III.1.7.2. Dosage en eau d'un béton de sable	42
III.1.7.3. Estimation de la résistance en compression	43
III.2. Résultats ENP	44
III.2.1. FORMULATION DES BETONS DE SABLE	44
III.2.2. Formulation de base (100% sable de dune)	46
III.2.3. Première série d'essais	49
III.2.4. Deuxième série d'essais	52

---

### CHAPITRE IV : CORRECTION GRANULOMETRIQUE DES BETONS DE SABLE

---

IV.1. Introduction	57
IV.2. Correction granulométrique par l'apport d'un sable concassé	57



IV.2.1. Correction des sables pauvres en fines	57
IV.2.2. Correction des sables mal gradués	57
IV.3. Correction par l'ajout de gravillons	58
IV.3.1. Spécifications sur gravillons pour béton hydraulique	58
IV.3.2. Principaux essais sur gravillons	60
IV.4. Dosage en gravillon	61
IV.5. L'influence de l'ajout de gravillons	62

CHAPITRE V : LA POUDRETTE DE CAOUTCHOUC

V.1. Le Caoutchouc	66
1. Présentation	66
2. Caoutchouc naturel	66
2.1. Historique	66
2.1.1. Vulcanisation	66
2.1.2. Récupération des rebuts	67
2.1.3. Durée de vie du caoutchouc	67
2.2. Obtention du caoutchouc brut	68
2.2.1. État naturel	68
2.2.2. Plantations à caoutchouc	68
2.2.3. Récolte du latex	69
2.3. Transformations industrielles	69
2.3.1. Produits de mélange	69
2.3.2. Vulcanisation	70
2.4. Propriétés physiques et chimiques	70
2.5. Utilisations	71
3. Caoutchouc synthétique	72
3.1. Historique	72
3.2. Principaux caoutchoucs synthétiques	73
3.2.1. Caoutchoucs Buna	73
3.2.2. EPM et EPDM	73
3.2.3. Caoutchouc butyle	73
3.2.4. Polyisoprène de synthèse	74
3.2.5. Néoprène	74
3.2.6. Caoutchouc nitrile	74
3.2.7. Autres caoutchoucs de spécialités	74
4. Production mondiale	75
V.2. La poudrette de caoutchouc	76
1. Introduction	76
2. La fabrication de poudrette de caoutchouc	76
3. utilisation dans le béton	77

## PARTIE EXPERIMENTALE

### CHAPITRE VI : IDENTIFICATION DES MATERIAUX UTILISES

VI.1. Introduction	79
VI.1.1. Analyse granulométrique	79
VI.1.2. Module de finesse	79
VI.1.3. Equivalent de sable	79
VI.1.4. Essai au bleu de méthylène	80
VI.1.5. Friabilité des sables	80
VI.1.6. Masses volumiques apparente et absolue	80
VI.1.7. Compacité et porosité	81
VI.1.8. Coefficient d'aplatissement des gravillons	81
VI.1.9. Analyse chimique	81
VI.2- Sable de dune	82
VI.2.1. Caractéristiques physiques	82
a) Analyse granulométrique	82
b) Propriétés physiques	83
VI.2.2. Analyse chimique	83
VI.3. Sable de concassage	84
VI.3.1. Caractéristiques physiques	84
a) Analyse granulométrique	84
b) Propriétés physiques	85
VI.3.2. Analyse Chimique	85
VI.4- Gravillon	86
VI.4.1. Caractéristiques physiques	86
a) Analyse granulométrie	86
b) Propriétés physiques	87
VI.4.2. Analyse chimique	88
VI.5. Conclusion	88
VI.6. La poudrette de caoutchouc	89
VI.7- L'eau de gâchage	89
VI.8- L'adjuvant	89
VI.9. Le ciment	89
VI.9.1. Analyse chimique	90
VI.9.2. Essais physico-mécaniques	91

### CHAPITRE VII : CARACTERISTIQUES DE BETON DE SABLE MODIFIE A I.A POUDRETTE DE CAOUTCHOUC

VII.1. Introduction	92
VII.2. Première série d'essais : étude des compositions témoins	94
VII.2.1. Composition (BSD0)	94
VII.2.2. Composition (BSDC0)	94
VII.3. Deuxième série d'essais : étude des compositions modifiées	96



VII.3.1. Compositions BSD PC	98
VII.3.2. Compositions BSDC PC	101
VII.4. Conclusion	102

---

CHAPITRE VIII : COMPORTEMENT DE BETON DE SABLE MODIFIE A LA  
POUDRETTE DE CAOUTCHOUC

---

VIII.1. Introduction	103
VIII.2. Comportement du béton en compression	103
VIII.3. Module d'élasticité	106
VIII.4. Coefficient de poisson	106
VIII.5. Interprétation des résultats	106
VIII.6. Conclusion	108
Conclusion générale	109

## LISTE DES FIGURES

### PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE

#### Chapitre II : Béton de sable

Figure 1 :	Fines sphériques et fines anguleuses	9
Figure 2 :	Différence entre le béton de sable chargé et le béton ordinaire	11
Figure 3 :	Granulats de caoutchouc	12
Figure 4 :	Eprouvettes non vibrées, non piquées	15
Figure 5 :	Courbe idéale de fluage	18
Figure 6 :	L'effet de la résistance sur le fluage	19
Figure 7 :	L'essai de maniabilité au maniabilimètre LCPC	21
Figure 8 :	Organigramme de la méthode théorique	30

#### Chapitre III : Résultats bibliographiques

Figure 01 :	Maniabilité en fonction du module de finesse du sable	35
Figure 02 :	Influence de la nature du sable sur la maniabilité	36
Figure 03 :	Effet de la granularité sur la résistance	37
Figure 04 :	la maniabilité en fonction du module de finesse	38
Figure 05 :	Influence de la nature des fines sur la maniabilité	38
Figure 06 :	Effet du dosage et de la finesse de l'addition sur la résistance	39
Figure 07 :	Influence de la nature de l'addition sur le niveau de résistance	39
Figure 08 :	Variation de l'adhérence d'une armature en fonction de formulation	40
Figure 09 :	Influence de la résistance en traction du béton de sable sur l'adhérence des armatures	40
Figure 10 :	Courbe de distribution de la porosité en fonction des rayons des pores	41
Figure 11 :	Influence du diamètre $D_{max}$ du sable sur le dosage en fines	41
Figure 12 :	Influence de la dimension $d$ sur la porosité minimale du béton pour deux tailles $D$ du sable	42
Figure 13 :	Relation entre l'ouvrabilité et le dosage ( $e + v$ ) d'une matrice pour une mise en oeuvre donnée	42
Figure 14 :	Coefficient d'activité du filler calcaire (modèle)	43
Figure 15 :	Evolution de la compacité en fonction du dosage du sable concassé	51
Figure 16 :	Evolution des résistances en fonction du dosage en sable concassé	51
Figure 17 :	Relation compacité dosage en gravillon	53
Figure 18 :	Relation résistance dosage en gravillon	54

#### Chapitre IV : Correction granulométrique

Figure 1 :	Influence du dosage en gravillon sur la résistance au choc	63
Figure 2 :	Influence de G/S sur la résistance à l'attrition	63
Figure 3 :	Influence de G/S sur la résistance à la compression	64



Figure 4 : Influence de G/S sur le module d'élasticité 65

Chapitre V : La poudrette de caoutchouc

Figure 1 : recyclage de caoutchouc



78

---

**PARTIE EXPERIMENTALE**

---

Chapitre VI : Identification des matériaux

Figure 1 : Courbe granulométrique du sable de dune 82

Figure 2 : Courbe granulométrique du sable de concassage 84

Figure 3 : Courbe granulométrique du gravillon 87

Chapitre VII : Caractéristiques de béton de sable modifié à la poudrette de caoutchouc

Figure 01 : Essai de traction par fendage 93

Figure 02 : Courbe de compacité en fonction de dosage en poudrette de caoutchouc (BSD PC) 98

Figure 03 : Courbe de maniabilité en fonction de dosage en poudrette de caoutchouc (BSD PC) 98

Figure 04 : Courbe de résistance en fonction de dosage en poudrette de caoutchouc (BSD PC) 99

Figure 05 : Courbe de compacité en fonction de dosage en poudrette de caoutchouc (BSDC PC) 100

Figure 06 : Courbe de maniabilité en fonction de dosage en poudrette de caoutchouc (BSDC PC) 100

Figure 07 : Courbe de résistance en fonction de dosage en poudrette de caoutchouc (BSDC PC) 101

Chapitre VIII : Comportement de béton de sable modifié à la poudrette de caoutchouc

Figure 01 : Eprouvette équipée de jauges placée entre les plateaux de la presse. 105

## LISTE DES TABLEAUX

### PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE

#### Chapitre II : Béton de sable

Tableau 01 : Relation entre le $D_{max}$ et le dosage minimal en ciment	9
---	---

#### Chapitre III : Résultats bibliographiques

Tableau 01 : Maniabilité en fonction du dosage en eau	48
Tableau 02 : Composition et caractéristiques de la formulation de base	49
Tableau 03 : Compositions du béton de sable avec ajout de sable concassé	50
Tableau 04 : Caractéristiques des différentes compositions avec ajout du sable concassé	50
Tableau 05 : Les compositions avec ajout du gravillon	52
Tableau 06 : Caractéristiques des différentes compositions avec ajout du gravillon	53

### PARTIE EXPERIMENTALE

#### Chapitre VI : Identification des matériaux

Tableau 01 : Analyse granulométrique du sable de dune	82
Tableau 02 : Propriétés physiques du sable de dune	83
Tableau 03 : Analyse chimique sommaire du sable de dune	83
Tableau 04 : Analyse granulométrique du sable de concassage	84
Tableau 05 : Propriétés physiques du sable de concassage	85
Tableau 06 : Analyse chimique sommaire du sable de concassage	85
Tableau 07 : Analyse granulométrique du gravillon	86
Tableau 08 : Propriétés physiques du gravillon	87
Tableau 09 : Analyse chimique sommaire du gravillon	88
Tableau 11 : Analyse chimique du ciment	90
Tableau 12 : Analyse physico-mécanique du ciment	91

#### Chapitre VII : Caractéristiques de béton de sable modifié à la poudre de caoutchouc

Tableau 01 : Caractéristiques de la composition (BSD0)	95
Tableau 02 : Caractéristiques de la composition (BSDC0)	95
Tableau 03 : Compositions BSD PC	96
Tableau 04 : Compositions BSDC PC	97
Tableau 05 : Caractéristiques des compositions BSD PC	97
Tableau 06 : Caractéristiques des compositions BSDC PC	97

#### Chapitre VII : Caractéristiques de béton de sable modifié à la poudre de caoutchouc



Tableau 1 :	Module d'élasticité des compositions BSD PC	106
Tableau 2 :	Module d'élasticité des compositions BSDC PC	106
Tableau 3 :	Coefficient de poisson des compositions BSD PC	106
Tableau 4 :	Coefficient de poisson des compositions BSDC PC	106

المدسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

# *SCHAPITRE : I*

## *INTRODUCTION GÉNÉRALE*



## INTRODUCTION GENERALE

L'Algérie est un pays où le besoin en matériaux de construction est intense.

Dans le sud, cette intensité est ressentie encore plus à cause de l'insuffisance marquée du gravier. Ce manque implique des surcoûts de la construction causés principalement par les frais de transport.

La dénomination « béton de sable » et non pas mortier, vient du fait que du point de vue consommation en ciment, ce matériau a un dosage identique à celui d'un béton classique, étant appelé à remplacer dans certains cas le béton de structure et non le mortier d'enduits.

Les bétons de sable ont donc les mêmes dosages en ciment que les bétons traditionnels (250 à 400 kg/m<sup>3</sup>); la compacité est atteinte par un ajout complémentaire de fines, généralement calcaires qui sont remplacées dans cette étude par la poudrette de caoutchouc.

Parfois, certains usages du béton exigent des caractéristiques mal assurées par le béton traditionnel et que le béton de sable peut mieux satisfaire, parmi ces particularités on cite :

- La maniabilité : Le béton de sable étant très maniable, sa mise en oeuvre, sa capacité à remplir des moules avec une énergie de serrage moindre et sans préjudice pour les autres propriétés de matériau, constituent un atout significatif.
- La cohésion et l'absence de ségrégation: La variation entre les dimensions des gains n'étant pas trop importante, ce matériau présente une assez bonne cohésion, faible ressuage et surtout une absence totale du problème de ségrégation.
- La petite granulométrie et la faible dimension des grains; le matériau serait utile dans les travaux d'injection, dans la mise en oeuvre des structures à fortes densités de ferrailage, ainsi que dans les travaux de rénovation de structures.
- Le transport : Le transport du béton de sable du lieu de production au lieu d'utilisation s'effectue par les mêmes moyens que les bétons classiques, bien que les bétons de sable soient généralement plus plastiques et les risques de ségrégation pendant le transport faibles ce qui permet son transport à des distances lointaines.
- L'aspect de surface: La granulométrie continue et serrée des bétons de sable permet la réalisation des effets architectoniques très esthétiques, soit sur la forme des



éléments, ou bien sur l'aspect de surface. Cet aspect est un souci de plus en plus recherché pour toutes les constructions.

En plus de ces caractéristiques, le béton de sable possède un autre intérêt plus important pour les régions du sud algérien et qui consiste à utiliser les sables qui se trouvent en abondance dans ces régions, ce qui conduit à des économies certaines.

Mais le béton de sable à l'état actuel des connaissances, ne peut pas prétendre à remplacer systématiquement le béton traditionnel surtout pour des raisons techniques et des exigences modernes. En effet, on ignore à ce jour, certaines de ses caractéristiques et comportement, alors que certaines autres caractéristiques, dénomment ses défauts en particulier son faible module d'élasticité.

Par ailleurs, on ne dispose que de peu d'éléments sur son comportement au fluage, ce qui l'exclut, dans l'immédiat, des éléments de structures fortement sollicités, ou précontraints. Dans ce cas, on utilise un béton de sable chargé par l'ajout de gravillons.

L'utilisation de la poudrette de caoutchouc en béton est une alternative suggérée par beaucoup d'auteurs. Le caoutchouc de pneu est conseillé quand la mécanique de résistance n'est pas la caractéristique principale mais la résistance à l'impact, au bas poids spécifique et à la dureté plus élevée.

Notre objectif, est de savoir l'influence de l'ajout de la poudrette de caoutchouc avec des faibles pourcentages sur le comportement de béton de sable. Pour atteindre ce but, nous avons adopté une méthodologie basée sur le critère de la résistance, de la maniabilité et de la compacité.

Notre mémoire comprend deux principales parties, la partie théorique et la partie expérimentale.

La première partie se compose de cinq chapitres :

- ❖ Le chapitre I, présente une introduction générale (avantages et inconvénients de béton de sable, historique...etc.) ;
- ❖ Le chapitre II, est consacré à la synthèse sur l'état actuel de connaissance sur les bétons de sable (définitions, constituants, méthodes de formulations, caractéristiques, utilisations...etc.) ;
- ❖ Le chapitre III, présente des résultats bibliographiques de « SABLOCRETE », et de recherches faites à l'école nationale polytechnique.



❖ Le chapitre IV, consacré à la correction granulométrique des bétons de sable

❖ Le chapitre V, traite la poudrette de caoutchouc (historiques, différents types de caoutchoucs, granulats de caoutchouc...etc.).

La deuxième partie se compose de trois chapitres :

❖ Le chapitre VI, présente l'identification des matériaux utilisés ;

❖ Le chapitre VII, s'intéresse aux caractéristiques de béton de sable modifié à la poudrette de caoutchouc ;

❖ Le chapitre VIII, présente le comportement de béton de sable modifié à la poudrette de caoutchouc.

## Historique

Le béton de sable est un matériau ancien, utilisé bien antérieurement au béton traditionnel d'aujourd'hui. Il trouve ses origines au milieu du 19<sup>ème</sup> siècle c'est à dire au début du développement du ciment armé.

En 1853 l'ingénieur François COIGNET a conçu ce qu'il appelait le béton aggloméré. Il s'agissait, en effet d'un mélange sans caillou, de cendres de scories de charbon brûlé, de terre argileuse cuite et pilée, de chaux hydraulique naturelle et d'eau en faible quantité [1]

Il construisit pour sa famille une vaste maison à saint Denis (Nord de Paris France) entièrement édifiée en béton aggloméré.

En 1869, le phare de Port-Saïd en Égypte de 52 mètres de hauteur fut construit en béton de sable de plage avoisinante et chaux importée de France.

Vers les années 1869 et 1872 un aqueduc de 40 km fut construit en béton aggloméré et sert à relier Fontainebleu à Orléans. Cette fois le mélange était constitué de 4 parts de sable de Fontainebleu et une part de liant (2/3 chaux, 1/3 ciment) et de 0,5 part d'eau ; ce qui correspond à un dosage en liant de 400 kg/m<sup>3</sup>; très proche du dosage du béton de sable que de celui des mortiers.

François COIGNET exporta sa technique jusqu'aux USA et c'est à New York que son entreprise (New York and long Island Coignet stone compagny) construisit vers les années 1871 et 1872 le pont de Brooklyn en blocs de béton aggloméré.

En 1918 on note l'expérience très originale qui fut faite par Nicolas DE ROCHEFORT à Saint -Peters Bourg (Russie). Cette expérience consistait à broyer ensemble une part de sable avec une autre part égale en ciment. Ce produit de broyage était ensuite mélangé avec trois parts de sable. Les résistances obtenues par le mélange furent les mêmes que celles d'un mélange composé d'une part de ciment et 2 parts de sable.

A partir de l'année 1910, avec le développement du béton à gros granulats et le remplacement de la chaux par le ciment, le béton aggloméré, ancêtre du béton de sable tombait en désuétude, sauf l'union soviétique qui ne cessa de réaliser diverses constructions avec des bétons composés essentiellement de sable et d'un ou deux liants.



Dans les années soixante dix, notamment en France, on constatait que les sables provenant de concassage des roches massives sont excédentaires, alors les extractions de granulats dans les lits des fleuves et des rivières compromettent les équilibres écologiques avec des conséquences irréversibles. Dans ce contexte s'ouvre la réflexion sur la formulation des nouveaux bétons de sable qui utiliseraient les ressources peu exploitées, ou complètement abandonnées et présenteraient des caractéristiques comparables à celles des bétons traditionnels.

A partir des années quatre-vingt, après le succès des premières applications de ce béton à l'initiative du laboratoire régional des ponts et chaussées de Bordeaux, et qui ont trouvé un écho auprès des autres organismes, que le béton de sable retrouve son grand intérêt au stade où on a enregistré un projet national appelé SABLOCRET [1], pour la promotion et le développement de ce matériau.

Mais promouvoir le développement de l'usage courant des bétons de sable nécessite de regrouper les initiatives et d'élaborer un solide programme de travail permettant d'enrichir les connaissances sur le matériau, son comportement et ses modes de mise en oeuvre.

En Algérie malgré l'intérêt qui pourrait apporter ce matériau au pays aucun programme n'a été mis en place, à l'exception d'une initiative du CNERIB en 1988 malheureusement abandonnée avant de reprendre les recherches ans les deux dernières années précédentes.

*PARTIE*  
*BIBLIOGRAPHIQUE*



*CHAPITRE : II*

*LE BÉTON DE  
SABLE*

### II.1. Introduction :

Le béton de sable est un matériau de construction connu bien avant le béton traditionnel d'aujourd'hui, comme certains ouvrages en témoignent. Cependant il a été complètement abandonné après la découverte du béton à gros granulats qui donne des performances meilleures. La raréfaction des gros granulats dans certaines régions entraînant un coût élevé suite à leur transport causent des surcoûts considérables à la construction d'une part, ainsi que la dégradation du réseau routier d'autre part.

En revanche, en Algérie les régions disposent d'un important gisement de sable sous forme de dunes et d'ergs; ce matériau, complètement abandonné et insuffisamment utilisé, et dont les technologies d'exploitation et de mise en oeuvre sont maîtrisables rapidement. Dans ces conditions et dans un but de valorisation des matériaux locaux, la question posée est : pourquoi ne pas remplacer la totalité des granulats par du sable disponible localement? Le béton de sable, qui présente une solution judicieuse, retrouve son intérêt à grande échelle. [3]

### II.2. Définition :

Le béton de sable est un béton fin, constitué d'un mélange de sable(s), de ciment, d'additions et d'eau. Par rapport à cette composition de base et pour répondre aux besoins de certains emplois, d'autres ajouts spécifiques (adjuvants, fibres, gravillons, colorant, etc.) peuvent être utilisés. [2] Du point de vue constituants, le béton de sable est semblable au mortier, alors que son dosage en ciment est semblable au béton classique (compris entre 250 kg/m<sup>3</sup> et 400 kg/m<sup>3</sup>). Le matériau « béton de sable » sera appelé à remplacer le béton de structure et non pas le mortier destiné aux enduits superficiels. Les bétons destinés aux éléments structuraux (poteaux, poutres... etc.) doivent avoir une résistance caractéristique suffisante. [3]

### II.3. Composition d'un béton de sable :

Un béton de sable est composé obligatoirement d'un mélange de base sable, ciment et eau, aux-quels d'autres ajouts spécifiques complémentaires peuvent être employés pour répondre aux besoins de certains usages. [3]



### II.3.1. Les sables :

Aucun critère granulaire n'est à priori exigible pour réaliser un béton de sable ; on peut utiliser aussi bien un sable fin même homométrique (type sable de dune), qu'un sable alluvionnaire moyen ou grossier ou de type (D/D) de concassage [1].

L'étendue des sables utilisés a été élargie afin de mieux préciser les différentes influences de leurs caractéristiques. La seule restriction d'emploi des sables réside dans leur propreté ; même si des études ont été faites sur les sables- pollués, aucune application n'a été réalisée avec ces sables. Les sables riches en fines naturelles nécessitent généralement beaucoup plus d'eau de gâchage, ce qui entraîne une chute de la résistance. Mais il est plus prudent à ce stade de se limiter à l'utilisation des sables propres tels qu'ils sont employés pour les bétons classiques.

### II.3.2. Les ciments :

Le ciment d'une façon générale peut être défini comme étant un matériau dont les propriétés de liaison et de cohésion permettent de lier, en un ensemble compact, des fragments de matériaux. Dans le bâtiment et le génie civil, on parle de ciment d'origine calcaire [5]. Les ciments utilisés dans la fabrication du béton ont la propriété de faire prise et de durcir avec l'eau en raison de leur réaction chimique avec celle-ci. Ils sont d'ailleurs appelés ciments hydrauliques. [3]

Le choix du ciment pour confectionner ou produire un béton de sable est fait à partir de sa classe de résistance, de ses caractéristiques d'hydratation et de l'agressivité du milieu et d'une façon générale de la composition du béton et de l'usage auquel il est destiné.

Pour bien exploiter l'activité hydraulique des fines ajoutées au mélange du béton de sable, les ciments type CPA (Ciment portland) sont préférables. [2]

### II.3.3. Les fines d'ajouts :

La compacité est l'une des qualités essentielles du béton, elle est en relation directe avec les principales caractéristiques du béton, comme la résistance en compression, en traction, le module de Young, le fluage... etc.

Les paramètres principaux qui influent sur la compacité sont:

- La granulométrie du mélange.
- La quantité d'eau incluse dans le mélange.
- L'énergie de mise en place.

La différence entre le béton ordinaire et le béton de sable réside principalement dans la gamme granulaire. Des fillers de dimensions majoritairement inférieures à 80  $\mu\text{m}$  sont utilisés pour remplir les vides entre les grains de sable afin de réduire la quantité de ciment. [1], [2]

Dans le cas d'un béton classique, on a les éléments les plus gros qui sont les gravillons (10 à 30 mm), et lui créent des macrovides que l'on peut remplir par du sable et les vides créés par ce dernier par des fines. Ces fines sont du ciment, puisque la quantité nécessaire de ciment pour assurer les performances mécaniques coïncide avec celle qu'il faut en fines pour obtenir la bonne compacité. Cette concordance entre besoin en fines et dosage en ciment est interprétée par la règle suivante: [1]

$$C=550/\sqrt[3]{D} \quad \text{ou} \quad C=700/\sqrt[3]{D} \quad (\text{selon l'usage du béton})$$

Où C : dosage du ciment

D : diamètre de plus grand granulat

Le tableau1 : donne le dosage minimum en ciment en fonction du diamètre maximal ( $D_{\text{max}}$ ) du granulat employé. [2]

Dans la conception de la composition du mélange, la quantité du fillers est considérée comme un liant au même titre que le ciment et donc on peut ainsi parler non plus du rapport (E/C) (eau/ciment), mais plutôt  $E/(C+kF)$  où C représente le dosage en ciment et F le dosage en fillers ; k représente le coefficient prenant en compte la nature du filler.



Tableau 1 : Relation entre le  $D_{\max}$  et le dosage minimal en ciment

Diamètre maximal (D) en (mm)	$C = 550\sqrt[5]{D}$	$C = 700\sqrt[5]{D}$	
25	290	370	BETON
20	300	385	
16	315	400	
8	360	460	
6.3	380	480	
4	415	530	MORTIER
2	480	610	
1	550	700	

La forme des grains et la nature géologique des fillers influent sur la quantité d'eau requise pour obtenir un mélange maniable. Ainsi, des Fillers avec des grains sphériques type filler calcaire, nécessitent moins d'eau que ceux à grains anguleux type filler siliceux, et par conséquent, assurent une meilleure compacité au mélange durci. (Figure 1 et 2). On distingue des fines actives (laitiers moulus et cendres volantes) et des fines passives, résultant du broyage de roches massives (fillers calcaires et fillers siliceux). [1]

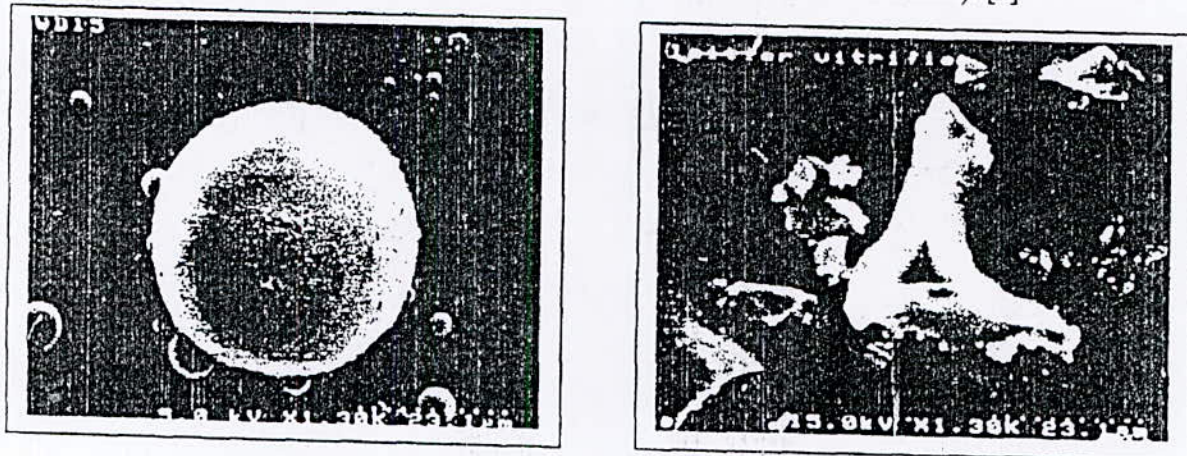


Figure 1 : Fines sphériques et fines anguleuses. [1]



Les fines actives s'hydratent en présence d'eau au même titre que le ciment et donc accrochent les particules de sable. Parmi les fines passives, les fillers calcaires ont la particularité de s'associer chimiquement avec les hydrates de ciment et donc favorisent l'adhérence entre les particules de sable. [1]

#### II.3.4. L'eau de gâchage :

L'eau sert à l'hydratation du liant, et au mouillage du granulat, elle permet aussi le malaxage du béton et par conséquent facilite sa mise en œuvre. Pour assurer ces rôles cette eau doit être conforme aux prescriptions des normes en qualité et en quantité.

Du point de vue qualitatif, l'eau doit être aussi exempte que possible d'impuretés telles que les argiles ou les matières humiques en suspension, elle ne doit être ni acide ni souillée de déchets industriels solubles [2]. Du point de vue quantitatif, elle doit être en rapport convenable avec le ciment et comprise entre certaines valeurs assez étroites conduisant à une résistance et une maniabilité acceptables.

Pour le béton de sable, les autres quantités d'eaux apportées par les différents constituants ne sont pas négligeables et leur somme avec l'eau de gâchage constitue l'eau efficace du béton.

#### II.3.5. Les adjuvants :

Les adjuvants sont les produits qui sont incorporés à faible dose dans les bétons, modifiant certaines de leurs propriétés; ils sont soit liquides soit pulvérulents. Leur emploi doit faire l'objet d'une étude mettant en évidence leur rôle et l'absence de perturbation des autres caractéristiques du béton. Ils sont nombreux dont les principaux sont : [1]

- Les entraîneurs d'air : utilisés dans certains usages dans le but de créer un réseau de micro-bulles dans le béton de sable pour le protéger du gel.
- Les plastifiants réducteurs d'eau : utilisés pour améliorer la maniabilité du béton. Ils permettent de réduire la quantité d'eau nécessaire ce qui entraîne une croissance de la résistance mécanique du béton ainsi qu'une meilleure cohésion du matériau lors du transport. Toutes fois, ils peuvent présenter un effet retardateur, lorsque leur dosage est



très important. Il faut profiter de cette propriété surtout lorsque les distances de transport sont grandes.

Les spécifications du béton, de sable privilégient toujours ce type d'adjuvant.

- Les fluidifiants : utilisés pour donner une certaine consistance fluide au béton pendant un temps limité.

En tout état de cause, des essais de compatibilité des adjuvants, des ciments et des éléments fins doivent être réalisés sur mortier au moment de l'étude.[3]

### II.3.6. Autres ajouts :

#### II.3.6.1. Les gravillons :

Le béton de sable peut contenir un certain pourcentage de gravillons et prend la dénomination de « béton de sable chargé ». En effet, tant que les gravillons sont dispersés dans le sable (figure 3), et ne constituent pas un squelette structuré, le comportement reste généralement le même. [1]

L'ajout de gravillons, en faible dosage, a pour objectif d'améliorer certaines caractéristiques du béton de sable telles que la maniabilité, le retrait, le fluage et la résistance mécanique. En pratique, on pourra considérer qu'on a un béton de sable tant que le rapport pondéral (gravillon/sable) reste inférieur à 0,7. [2]

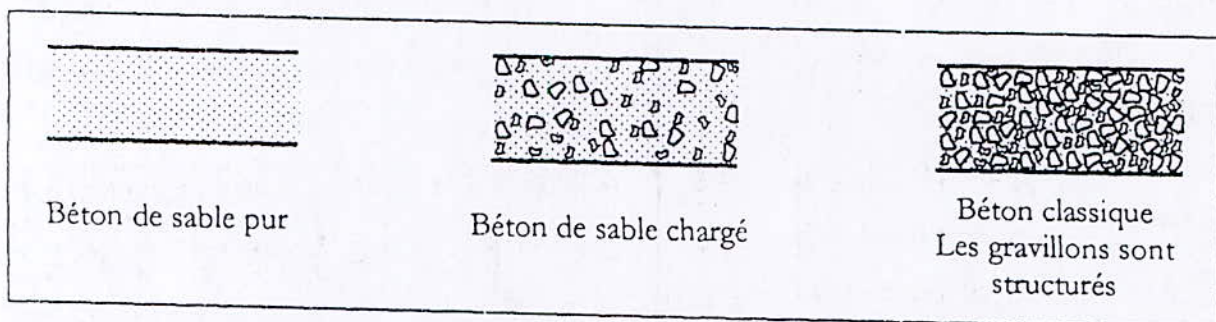


Figure 2 : différence entre le béton de sable chargé et le béton ordinaire

#### II.3.6.2. Les fibres :

Elles sont utilisées dans le but d'améliorer le comportement du béton aux jeunes âges ainsi que ses caractéristiques mécaniques. On utilise, dans le cas échéant, des fibres organiques

(polyester, polypropylène... etc.) pour limiter les effets de retrait, et de prise et éviter la fissuration qui en résulte.

Si l'objectif est d'améliorer la ductilité du béton, il est préférable, dans ce cas, d'utiliser des fibres d'acier.

#### II.3.6.3. Les colorants :

Dans certains usages particuliers du béton de sable, les colorants utilisés dans le béton classiques peuvent également être utilisés, à condition de prendre soin de l'homogénéisation et la stabilité de la teinte au cours du temps, pour cela il est recommandé de procéder à une formulation appropriée à ce cas.

#### II.3.6.4. la poudrette de caoutchouc :

Les poudrettes varient de granules 25.4mm aux poudrettes fines 0.2mm (figure 4)  
cette nouvelle matière a de nombreuses applications :

- Sous-sol de terrain de sport,
- Piste d'athlétisme,
- roulement de pneus.

L'utilisation de ce matériau en béton est une alternative suggérée par beaucoup d'auteurs. L'utilisation du caoutchouc de pneu est conseillée quand la mécanique de résistance n'est pas la caractéristique principale mais la résistance à l'impact, au bas poids spécifique et à la dureté plus élevée.

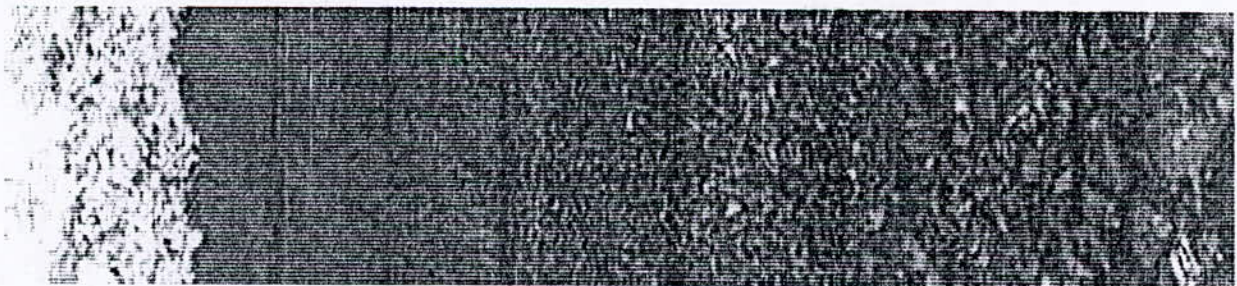


Figure 3 : granulats de caoutchouc



## II.4. propriétés essentielles du béton de sable :

### II.4.1. Granulométrie et maniabilité :

Les bétons de sable nécessitent plus d'eau de gâchage que les bétons traditionnels pour atteindre la même maniabilité. Le rapport E/C (eau/ciment) est systématiquement supérieur à 0,5, il est en général compris entre 0,6 et 0,7. Cette particularité est due à une surface spécifique plus importante du mélange qui doit être complètement mouillé, alors que si on considère le rapport E/(C+A) (addition en fines), on obtient des valeurs similaires aux bétons traditionnels.

### II.4.2. Granulométrie et résistance : [1]

Les matériaux employés dans le confectionnement des bétons sont en général plus ou moins tenaces. La granulométrie, le dosage en ciment, la nature des constituants, la quantité d'eau de gâchage, ainsi que d'autres paramètres plus ou moins importants ont des effets majeurs sur les résistances, à la traction, à la flexion et en particulier la résistance caractéristique spécifique du béton de sable qui est la résistance à la compression.

### II.4.3. La finesse des additions :

Plus l'addition est fine plus la compacité est importante (gain en résistance) ; ce résultat est valable quelque soit la granulométrie et la nature du sable (sable alluvionnaire, sable de dunes...etc.).

### II.4.4. La nature de fines l'addition :

L'ajout de fines d'additions aux bétons de sable permet d'améliorer systématiquement la résistance, ce gain en résistance est très variable à même dosage en fines.

### II.4.5. L'adhérence aux armatures :

Selon la formulation du béton de sable (donc son niveau de performance), on obtient des propriétés spécifiques à l'adhérence aux armatures plus ou moins bonnes. Quelques comparaisons ont été réalisées entre différentes formulations de béton de sable par rapport à un béton témoin traditionnel. Il s'agit de mesurer le déplacement d'une armature qui se trouve dans le matériau durci suite à l'application d'un effort de traction.



Sur la base des résultats de cet essai, on remarque que des variations de composition appliquées au béton de sable mènent à des écarts du même ordre que les bétons traditionnels, ce qui a amené à penser que les bétons de sable ne se distinguent pas particulièrement sur cet aspect des bétons traditionnels classiques.

#### II.4.6. Durabilité des bétons de sable : [1]

Conventionnellement, la durabilité d'un béton est reliée à ses capacités d'échange avec le milieu extérieur. De ce fait, il est évident que les paramètres tels que la porosité, l'organisation géométrique des pores et la perméabilité sont des paramètres physiques du premier ordre de la durabilité. De même, les phénomènes internes tels que l'alcalisation ou l'attaque sulfatique différée sont aussi des processus d'altération du béton accélérés par les échanges hydrauliques avec le milieu extérieur. La tenue du béton vis-à-vis des phénomènes d'échange dépend aussi de l'environnement de celui-ci, raison pour laquelle l'estimation de la durabilité s'effectue généralement par un ou plusieurs essais selon l'environnement prévisible du matériau (milieu urbain, montagnoux, marin...etc.). Ces essais de durabilité dont le but est de qualifier le béton vis-à-vis des attaques physico-chimiques, sont en général des essais accélérés qui permettent d'obtenir rapidement des informations comparatives.

#### II.4.7. Résistance au gel et au dégel :

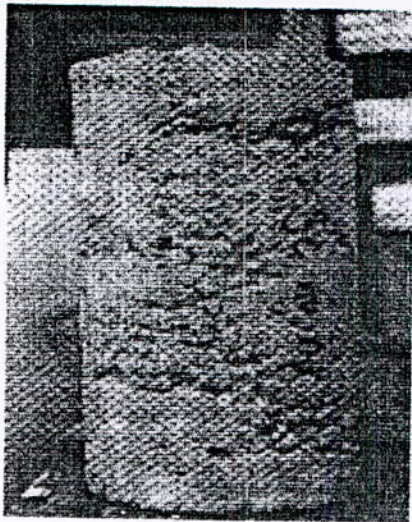
De même, la tenue au gel des bétons de sable formulés correctement est excellente. En effet, par comparaison à une étude menée sur un large éventail de formulations de bétons traditionnels, les bétons de sable à formulation et performance équivalentes résistent mieux au gel que les bétons traditionnels correspondants. Certains bétons de sable, même sans ajout d'entraîneur d'air, présentent une résistance au gel équivalente aux bétons classiques les plus performants de ce point de vue. Cette bonne tenue aux cycles gel- dégel, quand elle ne résulte pas d'une formulation visant, soit une très faible porosité, soit une porosité bien répartie par l'emploi d'entraîneur d'air, s'explique par la microstructure particulière des bétons de sable, qui est en général, caractérisée par une bonne répartition de micropores.



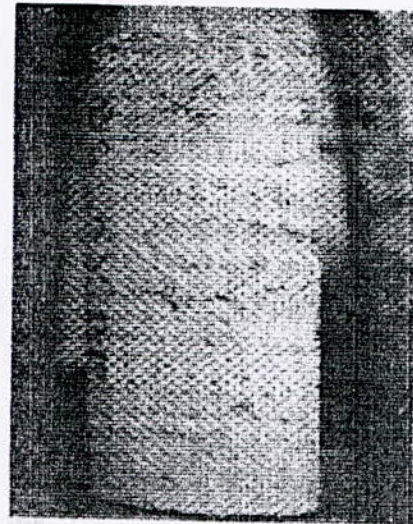
#### II.4.8. Phénomène de ségrégation des constituants :

Du fait de sa faible étendue granulaire, et donc de sa plus grande homogénéité, combinée à une bonne maniabilité, le béton de sable présente un meilleur comportement vis à vis des phénomènes de ségrégation que les bétons traditionnels. Cette faculté apparaît plus clairement à travers des expériences comparatives sur des bétons de sable et des bétons classiques équivalents, avec des plasticités et des modes de mise en œuvre variables.

Les deux figures qui suivent montrent les différences d'aspect de la peau de deux éprouvettes coulées, sans action extérieure sur le serrage, à des consistances plastiques équivalentes (cône de 14 cm).



a) Béton traditionnel.



b) béton de sable.

Figure 4 : Eprouvettes non vibrées, non piquées.

#### II.5. Propriétés spécifiques :

##### II.5.1. Le retrait : [4]

Les mortiers et les bétons subissent des variations importantes quand leur contenu en eau ou l'humidité du milieu environnant varie.

Immédiatement après le gâchage, a lieu une première réduction de volume irréversible. Après le durcissement de mélange et son exposition à l'air commence une nouvelle réduction de volume qui est partiellement réversible à la réhumidification.



La première réduction de volume due au séchage irréversible s'appelle contraction plastique et la réduction de volume due au séchage réversible s'appelle retrait. La contraction plastique est provoquée par l'hydratation des composants minéralogiques du ciment, tandis que le retrait est dû surtout à l'évaporation de l'eau contenue dans les pores.

On distingue les retraits suivants :

- le retrait d'hydratation ;
- le retrait d'évaporation avant prise ;
- le retrait hydraulique après prise ;
- le retrait thermique.

Pendant la période de prise, l'eau n'est pas encore liée aux constituants des ciments ; elle n'est retenue que physiquement et mécaniquement. L'évaporation se traduit par un tassement de béton donnant ainsi le retrait d'évaporation, qui, s'il est contrarié provoque de profondes fissures, visibles au démoulage.

Le retrait après prise est beaucoup plus lent à se manifester que le retrait avant prise. Il est dû à la perte d'une partie de l'eau de gâchage ; si le béton est conservé dans une atmosphère à faible humidité relative.

Le phénomène du retrait hydraulique a été beaucoup étudié, parce qu'il est en liaison avec la tendance à la fissuration des liants durcis qui représentent le premier signe de leur dégradation.

Les facteurs qui influent sur ce retrait sont nombreux :

- le retrait varie avec l'humidité relative et la température du milieu environnant. Il est d'autant plus important, que l'humidité de l'air est plus faible et la température plus élevée.
- Le retrait est d'autant plus grand que l'hydratation du ciment est plus accentuée. Les ciments finement broyés présentent un retrait plus grand que ceux qui ont été broyés grossièrement.
- La composition minéralogique du ciment influe sur le retrait, surtout si le ciment est riche en aluminat tricalcique.



- Le retrait dépend aussi des adjonctions minérales pulvérulentes ainsi que de la fraction fine de granulats.
- La forme des ouvrages et les armatures ont leur effet sur le retrait. Dans le cas des barrages, des murs épais, le retrait est négligeable ; par contre il peut être appréciable dans le cas des planchers, des dalles, des enduits.

Le retrait thermique est dû à des baisses de température provenant soit du ciment lui-même lors de son hydratation aux premiers âges suivie de son refroidissement, soit des variations climatiques du milieu.

Les retraits possibles sont nombreux, seul le retrait hydraulique sera traité dans l'étude expérimentale du béton de sable de dunes.

### II.5.2. Fluage : [4]

#### II.5.2.1. Rappel sur les mécanismes de fluage :

Le fluage est un phénomène de déformation différé sous une charge fixe indéfiniment appliquée. Le phénomène peut être constaté avec la même intensité, en traction, en compression, en torsion...etc., il est étroitement lié à la structure du matériau que confirment par ailleurs les valeurs du module d'élasticité.

Le déchargement des matériaux provoque une diminution instantanée des déformations très proches, en valeurs absolues, de celle d'une éprouvette témoin chargée à cet âge, suivie d'une diminution différée, appelée recouvrance, nettement inférieure au fluage correspondant, et se stabilise au cours de quelques semaines.

Le fluage dépend d'un certain nombre de paramètres en particulier :

- ♦ La charge appliquée : sous des charges modérées, on peut considérer qu'il est proportionnel à la charge appliquée, alors que si cette charge dépasse 50% de la charge à la rupture, le fluage croît plus vite que la contrainte.
- ♦ Nature du béton: dans le cas d'un béton léger, dont les granulats poreux constituent une réserve d'eau, leur fluage est en générale inférieur à celui d'un béton ordinaire de même résistance.

## II.5.2.2. Description d'une loi de fluage :

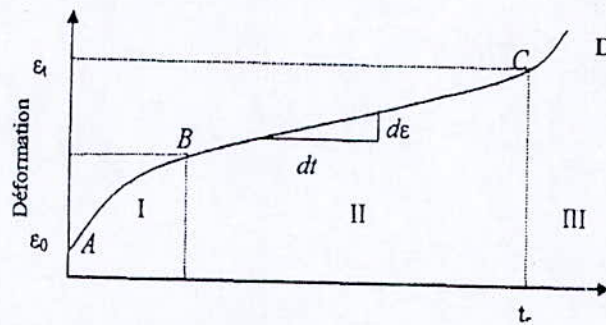


Figure 5 : courbe idéale de fluage [4]

Sur cette courbe on distingue :

- ♦ Une déformation élastique instantanée qui apparaît lors de l'application de la charge. Celle-ci est dépendante du module de Young.
- ♦ Le fluage primaire (AB) est une réponse viscoélastique, cette première phase du fluage démarre dès que l'échantillon se déforme élastiquement. Elle est caractérisée par une croissance de la vitesse de déformation, ainsi que par un phénomène d'écrouissage ou de durcissement.

Il faut signaler toute fois que ces résultats comparatifs sont obtenus à un niveau de résistance en compression de 25MPa , et qu'en matière de fluage notamment, un béton de sable plus résistant, n'a pas le même comportement: fluage plus faible voisin de celui d'un béton classique. Des études confirment cette hypothèse, puisqu'en passant de 25 à 50 MPa, on divise le fluage par 5: Au même niveau de résistance (exemple 50 MPa), le fluage du béton de sable n'est supérieur à celui d'un béton classique, de même niveau de résistance, que de 20%.



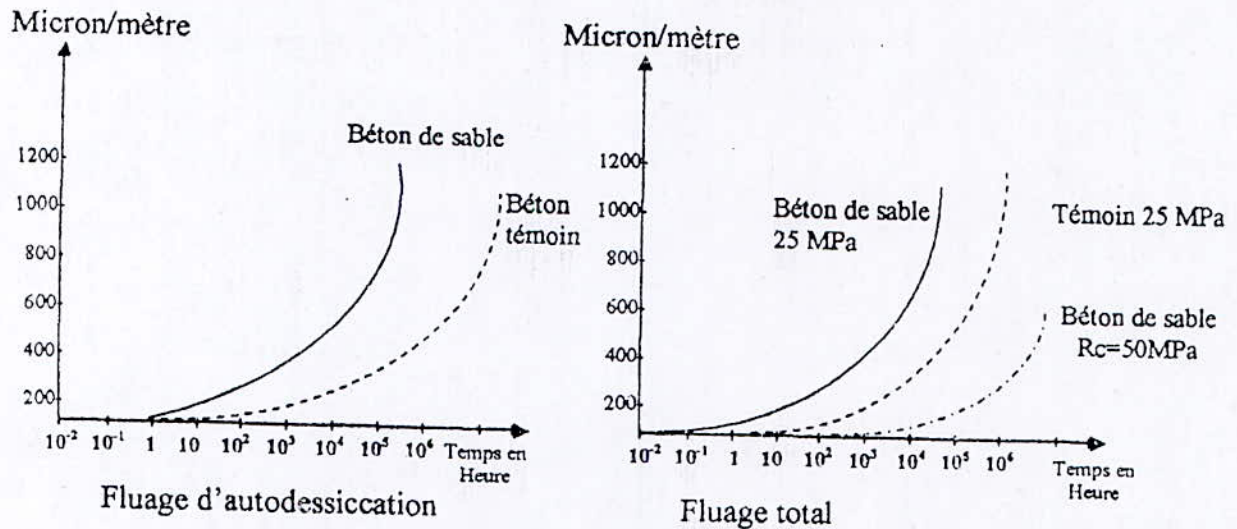


Figure 6 : l'effet de la résistance sur le fluage[I]

## II.6. Principaux essais sur béton de sable frais :

### II.6.1. Malaxage :

Le malaxage a une influence essentielle sur les caractéristiques des mortiers et bétons. Plusieurs variables peuvent intervenir sur cette opération dont les principales sont :

- Le type de malaxage : le meilleur est celui qui assure au mélange un déplacement des matériaux les uns par rapport aux autres (palette, cuve tournante,...) où seule l'action de la pesanteur est utilisée.
- La durée du malaxage : Que ce soit pour bétons de sable ou pour tout autre béton doit être suffisante pour obtenir l'homogénéité des constituants. Il est même déconseillé d'augmenter cette durée, car un entraînement d'air peut en résulter avec les conséquences qui en découlent (microbullage interne, réduction des performances,...).
- La vitesse de malaxage : le malaxage doit être rapide et les vitesses communiquées aux particules aussi grandes que possible pour mobiliser les grains du mélange.

La qualité du béton dépend beaucoup plus de l'homogénéisation du compound, non seulement au stade macroscopique, mais également au stade microscopique. Les

constituants actifs (ciment+ fines) doivent être introduits en dernier dans les mélangeurs, immédiatement avant mise de l'eau. Il faut qu'ils soient bien répartis entre et autour de tous les grains de sable.

Une stabilité du mélange parfaitement homogénéisée, favorable non seulement au point de vue de la maniabilité mais aussi au point de vue résistance qui, après prise et durcissement, sera uniformément répartie dans toute la masse.

#### II.6.2. Serrage des bétons de sable :

Cette opération consiste à accroître la compacité du béton de sable frais et maintenir sa cohésion lors de sa mise en place. Plusieurs techniques peuvent être utilisées : damage, picage, compression et vibration. Cette dernière semble la plus efficace pour les bétons, elle s'effectue par la paroi des moules et des coffrages, et sert à diminuer le frottement interne entre grains eux-mêmes, grains-paroi du moule et grains-armatures pour les bétons armés. Elle diminue la teneur en air et augmente la fluidité du béton, ce qui permet une mise en place facile.

#### II.6.3. Protection contre la dessiccation :

La dessiccation est l'action d'enlever au béton durci l'humidité qu'il renferme suite à un séchage naturel qui débute dès qu'une surface est soumise à une humidité relative externe inférieure à celle régnant dans le réseau poreux. Le flux d'humidité, qui entraîne une évaporation de l'eau à la surface (départ de l'eau vers l'extérieur), est induit par le déséquilibre d'humidité relative qui va engendrer une perte relative de masse et une apparition des micro-fissures à la surface du béton. La cure des surfaces du béton est réalisée soit par humidification, soit par application d'un produit de cure (adjuvant) ou d'une feuille de matière plastique.

#### II.6.4. La maniabilité :

La maniabilité d'un béton est une qualité aussi importante que sa compacité. Le choix d'un moyen de mesure de la maniabilité est la plupart du temps dicté par la particularité du mélange (c'est-à-dire le diamètre maximal des grains).

L'essai slump-test (ou affaissement au cône d'Abrams) ne peut pas être adopté pour



la mesure de la maniabilité des bétons de sable, parce qu'il est destiné à tester les bétons dont la taille des gros granulats est, au minimum, égale à 15 mm. [6]

Pour une meilleure approche de cette qualité, la maniabilité des bétons de sable peut être mesurée par un appareil mis au point au Laboratoire des Ponts et Chaussées par LEZY et LESAGE :

Le béton est testé à l'aide de l'appareil LCPC, constitué par un récipient prismatique séparé par une cloison en deux volumes. L'essai consiste à mesurer en quel temps le béton frais, introduit dans le premier volume, arrive à un repère gravé dans la paroi du second volume du récipient et ceci après l'enlèvement de la cloison séparatrice et fonctionnement du vibreur fixé sur l'appareil (figure 7).

Alors, le béton, sous l'action de la vibration s'écoule en un temps plus ou moins long dans le deuxième volume, suivant sa maniabilité. En fin de compte, c'est juste le temps d'écoulement qu'il y a lieu de mesurer, car pratiquement, ce temps correspond au temps réel de mise en place du béton.

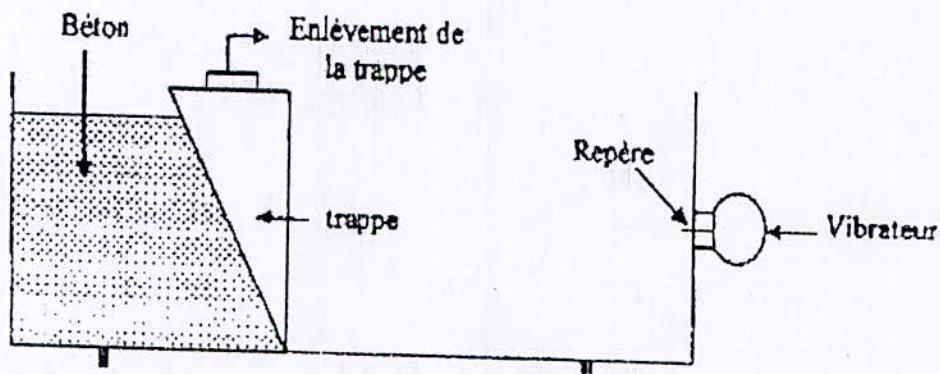


Figure 7 : L'essai de maniabilité au maniabilimètre LCPC. [7]

#### II.6.5. Essai de prise :

Des phénomènes chimiques, physico-chimiques et mécaniques interviennent dans les premières heures qui suivent le gâchage. Leur manifestation la plus importante est la prise : c'est la propriété qu'ont les liants hydrauliques de passer d'une consistance fluide à une consistance solide quand ils sont associés à l'eau. Le temps de prise, qui est le temps écoulé entre la fin de gâchage et le début de prise, est mesuré à l'aide de

l'aiguille de Vicat. On dit qu'il y a 'début de prise' lorsque l'aiguille n'est pas capable de transpercer la totalité de la pâte mais s'arrête au moins à 2,5 mm du fond du moule : des aiguilles d'ettringite apparaissent.

La fin de prise se situe au moment où l'aiguille de Vicat s'arrête à 2,5 mm du niveau supérieur, une faible quantité de l'anhydre a été hydratée et la résistance en compression continue à accroître au fur et à mesure que l'hydratation progresse.

#### II.6.6. Essai sur la masse volumique :

Effectuée sur du béton frais, la masse volumique est la masse d'un échantillon de ce béton occupant l'unité de volume, tous vides inclus. Cette caractéristique est très importante, elle indique la qualité en terme de compacité et par conséquent en terme de résistance mécanique. Les mélanges dont la masse volumique est relativement grande ont des résistances élevées. La masse volumique des bétons de sable de dune varie autour de  $2100 \text{ kg/m}^3$  [3], contre une masse volumique de  $2500 \text{ kg/m}^3$  pour les bétons classiques.

#### II.7. Domaine d'emploi des bétons de sable :

La plupart des applications actuelles du béton de sable tiennent davantage à ses propriétés spécifiques, par rapport au béton traditionnel, qu'à l'économie qu'il pourrait représenter en remplaçant celui-ci. [3]

Pour ses qualités d'ouvrabilité (bon garnissage des moules, bon enrobage des aciers même en cas de ferrailage dense), son absence de ségrégation et principalement sans doute pour ses qualités d'aspect qui autorisent de séduisants effets architectoniques.

##### II.7.1. Les bétons non vibrés :

Ces bétons sont souvent des bétons fluides utilisés notamment, lorsque la vibration est impossible, pour la fabrication des pieux forés et la réalisation de dallages autocompactants ou autonivelants.



### II.7.2. Les bétons projetés :

Ils se sont révélés particulièrement intéressants, techniquement et économiquement et se prêtent au renforcement de structure par projection, exemple :

- La réhabilitation de collecteurs d'assainissement.
- La stabilisation de parois ou talus.

### II.7.3. Les travaux d'injection :

A cause de sa petite granularité et sa maniabilité, le béton de sable est favorable aux techniques de reprise en sous-oeuvre par injection ou coulage gravitaire :

- le comblement de cavités.
- la réparation de fondation et renforcement d'ouvrages portuaires.

### II.7.4. La préfabrication d'éléments destinés à rester apparents :

Le souci esthétique est de plus en plus pris en compte dans toutes les constructions ; les bétons de sable permettent la réalisation d'effets architectoniques tant sur la forme que sur l'aspect.

### II.8. Désignation d'un béton de sable :

La désignation abrégée dans laquelle le symbole «BS» signifie «béton de sable » respecte toutes les spécifications des caractères normalisés et les éventuels caractères complémentaires définis à la commande ; ce symbole est suivi d'une classe de résistance caractéristique en MPa et de classe d'ouvrabilité.

Pour un béton de sable chargé, la granularité de la charge n'est indiquée qu'en caractère complémentaire. On a par exemple :

- BS 15-TP-NA- CPJ45 : désigne un béton de sable sans gravillon, de classe de résistance 15 MPa, de consistance très plastique, non armé et confectionné avec un ciment de type et de nature CPJ 45.
- BS 25 3/8-FL-BA : désigne un béton de sable chargé par un granulat 3/8, de classe de résistance 25 MPa, de consistance fluide, béton armé.

## II.10. Les méthodes de formulation :

### II.10.1. Définition :

Le but de la formulation d'un béton de sable est de trouver les proportions des différents constituants, à fin de réaliser un béton optimisé dans son squelette granulaire et dont les qualités sont celles qui répondent aux critères techniques et économiques. Ainsi toutes les méthodes de formulation des bétons ne relèvent pas d'une science exacte, c'est pourquoi une étude théorique ne conduit qu'à une approche du problème. Une étude expérimentale basée sur la réalisation des gâchées successives permettra d'adapter et de corriger la formulation théorique. A ce titre il y a lieu de présenter deux types de formulations, dont l'une est théorique et l'autre est expérimentale, en se basant sur les deux critères principaux des bétons structuraux

- La résistance mécanique.
- La maniabilité qui est la facilité de la mise en oeuvre.

### II.10.2. Approche théorique d'une formulation d'un béton de sable :

Les granulats d'un béton jouent un rôle d'ossature et la pâte (généralement le ciment avec l'eau) assure, dans un premier temps, la cohésion et l'écoulement, puis joue le rôle d'une colle liant les granulats et donnant une certaine durabilité au matériau durci.

Le premier problème qui se pose lors d'une formulation d'un béton est la compacité du squelette granulaire définie comme le rapport du volume des constituants solides sur le volume total du mélange; il faut assurer au mélange une compacité maximale et donc diminuer au maximum la porosité. Cependant la détermination de cette compacité maximale n'est pas facile et fait l'objet de modélisation poussée. Caquot [3] a pu établir à partir des données expérimentales une relation mathématique reliant le volume des vides d'un mélange granulaire présentant une compacité maximale et son étendue granulaire ( $d/D_{max}$ ).

Pour ce mélange optimisé la relation de Caquot s'écrit comme suit :

$$V = V_0 (d / D_{max})^{1/5} \quad (1)$$

V : Volume des vides du mélange granulaire ;



$V_0$  : Constante expérimentale comprise entre 0,7 et 0,8 ;

$d$  : La dimension du plus petit grain de l'étendue granulaire ;

$D_{\max}$  : La dimension du plus gros grain de l'étendue granulaire.

Cette formule a innové le domaine de formulation des bétons et elle est à la base de nombreuses méthodes utilisées telles que l'approche de Faury, Bolomey, Dreux, etc. Elle trouve aussi son application aux bétons de sable pour la détermination des différents dosages des constituants, tout en faisant quelques adaptations à ce cas précis.

#### II.10.2.1. Dosage en fines d'un béton de sable :

Dans le but d'optimiser la compacité du béton de sable, les constituants du mélange sont séparés en deux fractions:

1. Les éléments fins qui regroupent tous les grains de taille inférieure à  $80 \mu\text{m}$  et qui sont le ciment, les fines d'ajout et la fraction du sable inférieure à  $80 \mu\text{m}$ .
2. Toute l'étendue du sable comprise entre  $80 \mu\text{m}$  et le diamètre maximal du sable  $D_{\max}$ ,

Ainsi que l'éventuelle fraction des éléments supérieurs à  $80 \mu\text{m}$ . provenant des fines d'ajout.

En faisant cette distinction entre les fines incluant les éléments inférieurs à  $80 \mu\text{m}$  et l'étendue du sable comprise entre  $80 \mu\text{m}$  et le diamètre maximal, la porosité du sable peut être calculée selon la formule précédente de Caquot :

$$P_s = V = 0.75 (0.08/D)^{1/5} \quad (2)$$

$P_s (v)$  : Porosité du sable d'étendu  $80 \mu\text{m}$  et  $D_{\max}$ .

$D_{\max}$  : Diamètre maximal du plus gros grain du mélange.

La constante expérimentale ( $V_0$ ) est prise comme étant la moyenne des valeurs extrêmes (0.7, 0.8).

Un dosage optimal en fines d'ajout sert à compléter l'étendue granulaire bornée inférieurement par la coupure  $80 \mu\text{m}$ , et à combler la porosité du sable ainsi calculée. En effet, il est impossible de prendre en compte la distribution de la taille pour les fines d'ajout car l'assemblage géométrique relève surtout des forces électriques inter-granulaires.

En apportant quelques simplifications, Caquot s'est rendu compte que le volume de l'ensemble des particules fines ( $< 80 \mu\text{m}$ ) et le volume des vides associé à l'empilement de ces fines sont égaux, autrement dit le volume des vides restant dans le mélange est égal au volume de l'ensemble des fines d'ajout.

$$[\text{Fines}] = [\text{Vides}].$$

Il suffit de combiner les deux résultats précédents de Caquot pour en déduire que le dosage volumique optimal en fines d'ajout est la moitié de la porosité du sable et que l'autre moitié correspond à la porosité minimale résiduelle.

$$[\text{Fines}] = 0.38 (0.08/D_{\text{max}})^{1/5}$$

Cette dernière formule montre que le dosage en fines dépend surtout de la dimension du plus gros grain, il apparaît très clair que plus le diamètre maximum diminue plus le dosage en fines augmente.

#### II.10.2.2. Dosage en eau d'un béton de sable :

Après optimisation du squelette granulaire, la compacité maximale conduisant à une porosité minimale ne sera atteinte que si la consistance le permet ; pour cela d'autres travaux de Caquot sur la compacité ont abouti à une autre relation à partir de la relation de base, en admettant que la porosité du squelette granulaire se décompose en la somme d'un volume d'eau et d'un volume de vide piégé notés respectivement  $e$  et  $v$ .

$$(e+v)_{\text{min.}} = 0.8 (d/ D_{\text{max}})^{1/5} \quad (3)$$

Cette formule exige la connaissance de la plus petite dimension de l'étendue granulaire du mélange ( $d$ ). L'estimation de cette valeur dans le cas d'un mélange totalement défloculé (chaque particule élémentaire agit indépendamment) est donnée par la formule suivante :

$$d = (60/ (f.r)) \text{ mm.} \quad (4)$$

Avec:

$f$  : surface spécifique exprimée en  $\text{cm}^2/\text{g}$  du constituant.

$r$  : densité du constituant exprimée en  $\text{g}/\text{cm}^3$ .

C'est la moyenne harmonique de la dimension des grains les plus fins du constituant assimilés à des sphères. Cette définition de ( $d$ ) ne peut pas être retenue pour les mélanges



floculés: la dimension des floccs relevant des considérations physico-chimiques très complexes. Un ordre de grandeur peut être avancé de l'ordre de 20 à 25  $\mu\text{m}$  pour le diamètre ; ainsi l'élargissement de l'étendue est la seule solution pour la réduction de la porosité théorique minimale.

L'expérience montre que pour des quantités d'eau inférieures à la quantité d'eau permettant d'obtenir l'ouvrabilité optimale, le mélange piégera une forte quantité d'air quelques soient les moyens de serrage utilisés, et par suite une porosité  $(e+v)$  supérieure à  $(e+v)_{\text{min}}$ , alors pour des quantités d'eau supérieures à celle qui donne l'ouvrabilité optimale, la quantité d'air piégée reste stable et l'ouvrabilité augmente de façon linéaire.

Finalement, pour estimer le dosage en eau, il faut préalablement évaluer la quantité d'air piégée. Dans les bétons de sable cette quantité est légèrement supérieure à celle des bétons ordinaires et la formule qui suit conduit à des teneurs en air de l'ordre de 3 à 5%.

$$[\text{Vide}] = K [\text{eau}] \quad (5)$$

Avec :

K : constante comprise entre 0.2 et 0.25.

#### II.10.2.3. Dosage en sable :

Afin de compléter un volume unitaire de béton de sable, (1  $\text{m}^3$ ), de la formulation, le dosage en sable est obtenu en faisant soustraire au mètre cube du mélange les dosages estimés précédemment des autres constituants (fins, eau, vide).

$$[\text{Sable}] = 1000 - [\text{fine}] - [\text{eau}] - [\text{vide}] \quad (\text{l}/\text{m}^3). \quad (6)$$

Il reste à noter que le volume du sable ainsi calculé regroupe toutes les particules de taille supérieure à 80 $\mu\text{m}$ , soit du sable, soit de la fraction des fines d'addition.

#### II.10.2.4. Estimation de la résistance en compression :

Après avoir optimisé la compacité et déterminé les différentes proportions des constituants, il est jugé nécessaire d'évaluer la résistance à la compression de ce mélange. Pour ce faire, comme tous les autres mélanges à base de ciment, les méthodes classiques sont adaptées. Ces méthodes faisant intervenir la contribution de tous les paramètres

influant sur la résistance : le squelette granulaire, la nature des liants, et les dosages des constituants de la pâte.

Dans le cas de bétons formulés avec des fines potentiellement réactives, une généralisation de la formule de FERET [1] a été proposée récemment.

$$R_b = \frac{K_f \times R_c}{\left(1 + \frac{3.1(e+v)}{c(1+K_1+K_2)}\right)^2} \quad (7)$$

$K_f$  : coefficient granulaire compris entre 4.5 et 5 ;

$R_c$  : classe vraie du ciment (MPa) ;

$e$  : dosage en eau total ( $l/m^3$ ) ;

$V$  : air piégé ( $l/m^3$ ) ;

$C$  : dosage en ciment ( $kg/m^3$ ) ;

$R_b$  : résistance à la compression du béton à 28 jours (MPa).

Avec :

$$K_1 = K_{cv} (CV/C) + K_{fs} (FS/C);$$

$$0.2 < K_{cv} < 0.4 \quad 2 < K_{fs} < 3.3 \quad K_1 \leq 0.5$$

$$K_2 = K_{fil} (Fil/C);$$

$$0 < K_{fil} \leq 0.4$$

$$K_1 < 0.2$$

$K_1$  : coefficient pouzzolanique

$K_2$  : coefficient d'activité du filler calcaire.

$K_{cv}$ ,  $K_{fs}$ ,  $K_{fil}$  : coefficients d'équivalence en ciment des différentes additions en fines.

CV, FS, FIL : dosage en cendres volantes, fumée de silice et tiller calcaire ( $kg/m^3$ )

Cette formule ne peut être utilisée que par une identification précise de l'activité des additions par l'intermédiaire des coefficients déjà mentionnés. Les valeurs données pour les différents coefficients d'activité ont, ici, un caractère essentiellement indicatif, d'autres



additions peuvent être également utilisées, telles que les fines siliceuses généralement considérées inertes et les fines de laitier qui peuvent présenter un caractère hydraulique non pris en compte dans la formule précédente [1], alors que d'autres paramètres pourraient influencer sur l'activité liante des fillers telles que la répartition granulaire, la forme des grains, et leur porosité. Cette activité pour chaque type de filler présente un optimum au-delà duquel elle ne développe plus des performances mécaniques.

Sur la base de la remarque de l'activité des fillers, un autre paramètre s'ajoute pour le dosage en fines, tous fois le dosage en fines est estimé en terme de compacité regroupant les fines d'addition et le ciment, alors que l'optimum de la résistance s'obtient en se fixant le rapport des dosages en fines d'addition-ciment au maximum d'activité. Le problème revient à résoudre le système de deux équations simples

- Dosage en ciment + dosage en fines d'ajout = dosage en fines.
- Dosage en fines d'ajout / dosage en ciment = optimum d'activité.

Cette formulation théorique simple et performante donne la possibilité au formulateur de jouer sur certains paramètres en restant à la compacité maximale, elle constitue une bonne base pour la mise au point d'une formulation de béton de sable. Elle ne peut être utilisée que dans un cadre limité, ceci est dû aux nombreuses hypothèses qui la jalonnent, c'est aussi pour ça que cette approche ne sera acceptée qu'après passage à l'expérience qui la confirme ou l'ajuste.

On peut résumer toutes les étapes de la formulation théorique sous forme d'organigramme.

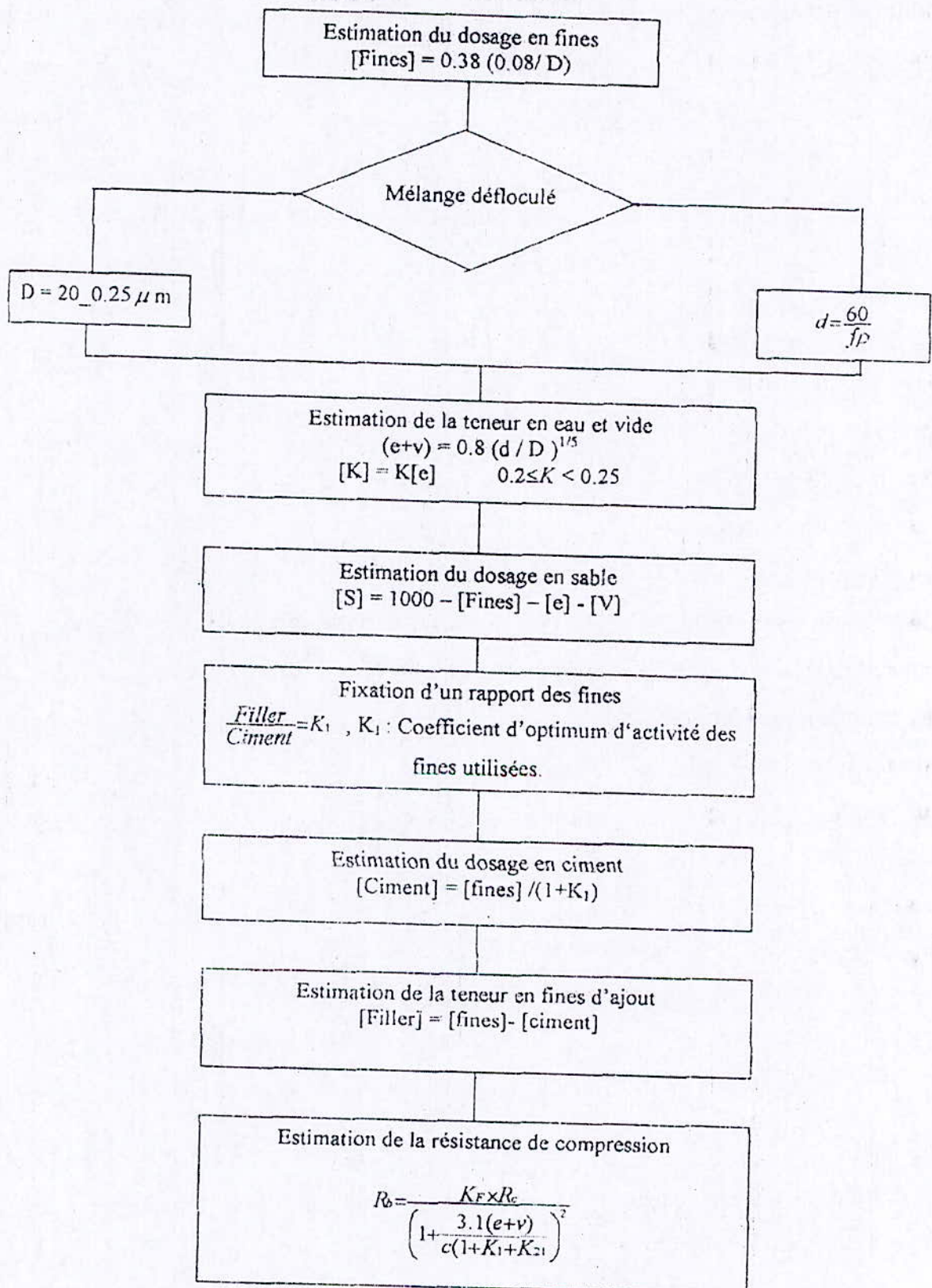


Figure 8 : organigramme de la méthode théorique [3]



### II.10.3. Approche expérimentale de la formulation d'un béton de sable :

Dans le même but recherché par l'approche théorique, diverses méthodes expérimentales ont été mises au point ; ceci est dû aux nombreux facteurs qui sont à prendre en compte lors d'une étude de composition d'un béton. Chacune de ces formules conférerait au béton certaines qualités au même temps des défauts. La base de toutes ces méthodes est la réalisation de légères gâchées de béton à fin d'effectuer quelques mesures susceptibles de donner une appréciation à l'aptitude du béton dans sa destination.

La méthode présentée ici est une adaptation de la méthode de Baron-LESAGE : Méthode itérative, les gâchées réalisées sont caractérisées par des mesures de la maniabilité et de la masse volumique apparente. A noter que plusieurs formulations de béton de sable ont déjà été réalisées par cette méthode et ont donné toute satisfaction.

#### II.10.3.1. Etape de la formulation :

Après avoir rendu compte des matériaux entrant dans la composition du béton par une identification précise, l'obtention du mélange doit satisfaire à l'ordonnancement suivant :

##### II.10.3.1.a. Détermination d'une formule de base sans fines d'addition :

Pour cela on cherche à réaliser un béton de sable dont la maniabilité est comprise entre 7 et 10 secondes au maniabilimètre LCPL ; ce béton est composé seulement de ciment, d'eau et de sable.

#### 1. Le dosage en ciment :

Les dosages en ciment sont souvent influencés par la destination du béton (bâtiment, barrage, milieu agressif...etc.), mais on opte toujours à des minimums selon les prescriptions et les normes en vigueur. Ces dosages sont fixés lors de l'étude et notés par C ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).

#### 2. Dosage en eau :

L'estimation du dosage en eau est approximative. A ce stade de la formulation et sur la base de l'expérience, les praticiens donnent à titre indicatif un dosage en eau de  $220 \text{ l}/\text{m}^3$  pour un dosage en ciment de  $350 \text{ kg}/\text{m}^3$ ,  $250 \text{ l}/\text{m}^3$  d'eau pour un dosage en ciment de  $400 \text{ Kg}/\text{m}^3$ , mais on peut toujours utiliser la formule exposée dans la méthode théorique

permettant d'estimer la quantité d'eau.

#### II.10.3.1.b. Dosage en sable :

Dans un premier temps et pour permettre la défloculation des fines, on utilise un fluidifiant réducteur d'eau au dosage normal préconisé par le fabricant et qui est un pourcentage d'éléments inférieurs à  $80 \mu\text{m}$  [1]. Connaissant sa densité, on peut avoir son volume, en sachant aussi que le béton contient toujours un volume d'air résiduel qui se situe entre 5 % et 7 % du volume dans le béton de sable. Le dosage en sable peut être calculé par soustraction des différents volumes des constituants précédents

$$V_{\text{sable}} = 1000 - V_c - V_{\text{adj}} - V_{\text{air}} - V_{\text{eau}} \quad (8)$$

(les volumes sont exprimés en litre).

Connaissant la masse volumique absolue du sable, on peut déduire la masse nécessaire pour la formulation d'un mètre cube du béton de sable.

$$M_{\text{sable}} = MVA \cdot V_{\text{sable}}$$

$M_{\text{sable}}$ : masse nécessaire pour  $1 \text{ m}^3$  du béton de sable.

$MVA_{\text{sable}}$ : masse volumique absolue du sable.

$V_{\text{sable}}$ : volume du sable.

Après détermination des différentes proportions des constituants, cette formulation permet de calculer la masse volumique apparente théorique (MVAT) en sommant l'ensemble des masses ainsi calculées pour le volume unitaire ( $1 \text{ m}^3$ ).

$$MVAT = m_{\text{ciment}} + m_{\text{eau}} + m_{\text{adj}} + m_{\text{sable}} \quad (9)$$

#### II.10.3.2. Réglage de la maniabilité et du rendement de la formule :

Le mélange obtenu selon les formules précédentes doit répondre aux objectifs fixés et qui se résument dans les deux critères essentiels :

- La masse volumique apparente réelle doit être égale à la masse volumique apparente théorique calculée par la formule (9)
- La maniabilité du mélange sera comprise entre 7 et 10 s selon le maniabilimètre LCPC.



Dans le cas où la masse volumique apparente réelle (MVAR) obtenue via l'expérience ne correspond pas à la masse volumique apparente théorique (MVAT), la formule du béton doit être corrigée à l'aide de l'équation itérative suivante (correction sur le sable).

$$S_i = S_{i-1}(MVAT_{i-1} - MVAR_{i-1}) + V * MVA_{\text{sable}} \quad (10)$$

Où

$S_i$  : dosage en sable après correction

$S_{i-1}$  : dosage en sable avant correction

MVAT, MVAR : les masses volumiques du béton théorique et réelle

$MV_{\text{sable}}$  : masse volumique absolue du sable

V : le volume d'eau à rajouter ou à retrancher selon l'écoulement.

Il sera rajouté si l'écoulement au maniabilimètre est supérieur à 10s (-V dans la formule précédente).

Il sera retranché si l'écoulement au maniabilimètre est inférieur à 7s (+V dans la formule)

Après chaque correction la masse volumique théorique sera comparée à la masse volumique réelle. En ajustant le dosage en eau et en sable conformément à ce principe, le dosage en eau devient définitif et le temps d'écoulement est alors compris entre 7 et 10 s, et la formule faite pour le mètre cube du béton de sable

### II.10.3.3. Détermination du dosage en fines d'adition :

Les fines d'ajout sont destinées à corriger l'indice des vides des sables et à limiter le dosage en ciment des bétons de sable. Elles sont incorporées au mélange de base à un rapport E / C constant et à un dosage optionnel permettant d'augmenter la compacité sans changement du volume total, ce qui revient à dire que la masse volumique théorique du mélange et la masse volumique réelle restent égales. Pour cela des gâchées de béton de sable seront réalisées aux différents dosages en fines dans leur plage d'emploi usuelle.

Pour chaque gâchée, les essais de maniabilité et la détermination de la masse volumique doivent être réalisés afin de les comparer aux critères imposés et fixés précédemment. Si ces derniers ne sont pas vérifiés, la correction sur le sable s'effectue toujours selon la formule suivante jusqu'à égalité des masses volumiques théorique et expérimentale.

$$S_i = S_{i-1} - (MVAT_{i-1} - MVAR_{i-1}) \quad (11)$$

Connaissant la maniabilité et la masse volumique pour chaque dosage en fines d'addition, on trace les courbes correspondantes : la masse volumique en fonction du dosage en fines et l'évolution de la maniabilité en fonction du dosage en fines. Ces deux courbes permettent de définir les dosages optimums en fines et en sable correspondant à la formule la plus compacte et la plus maniable.

Toutefois pour des raisons économiques ou lorsque l'ajout de fines n'améliore que très peu les caractéristiques, le dosage en fines peut être pris avant l'optimum [1]

#### II.10.4. Evaluation de la résistance :

Dans le but de détermination de la résistance caractéristique du béton de sable ainsi formulé, des essais mécaniques classiques sont effectués. Si les résistances obtenues ne correspondent pas à celles recherchées, elles peuvent être modifiées en jouant sur les paramètres de départ; augmentation ou réduction du dosage en eau, en adjuvant, ou changement du ciment.

La méthode expérimentale permet de formuler des bétons de sable et conduit à réaliser un nombre important de gâchées en laboratoire ; le recours préalable à une approche théorique constitue un outil efficace et utile et permet de réduire considérablement le nombre de gâchées.



*CHAPITRE : III*

*RÉSULTATS  
BIBLIOGRAPHIQUES*

Dans ce chapitre on donne quelques résultats bibliographiques tel que :

- ♦ SABLOCRETE.
- ♦ ENP (LCE).

### III.1. Résultats SABLOCRETE :

#### III.1.1. Granulométrie et maniabilité :

La granulométrie du sable jouera également sur le besoin en eau ; plus le sable est riche en éléments grossiers, plus la maniabilité s'améliore.

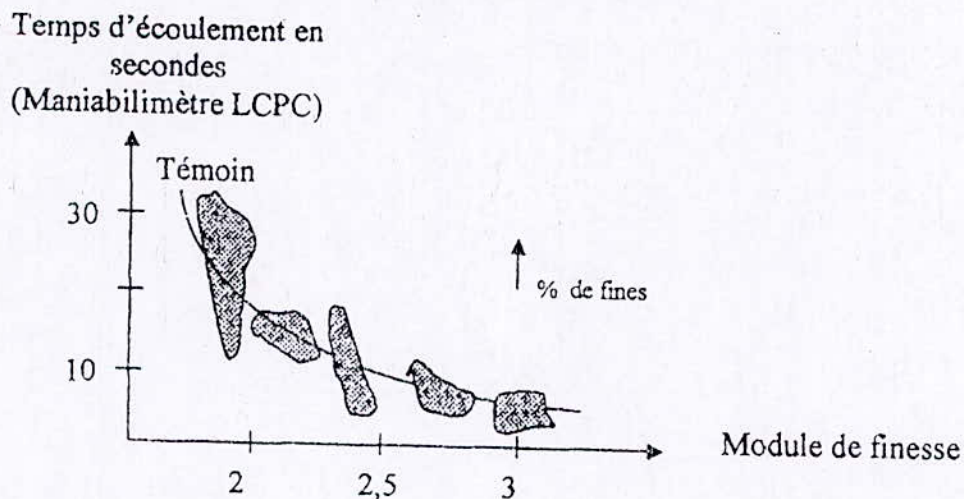


Figure 1 : Maniabilité en fonction du module de finesse du sable

La (figure 1) montre l'effet des éléments grossiers sur la maniabilité du béton. Cinq sables ont été utilisés, chacun à des teneurs en fines variables entre 0 et 10%. D'un sable à un autre présenté sur la (figure 4) on a pu constater que l'augmentation du module de finesse entraîne une diminution du temps d'écoulement et donc une amélioration de la maniabilité. On remarque ainsi que pour chaque sable l'augmentation de la teneur en fines diminue implicitement le module de finesse et entraîne de ce fait une maniabilité moins bonne. Ce phénomène n'a pas un caractère systématique, il dépend de la nature des fines incorporées car l'ajout des fines de type sphérique diminue la quantité des vides et rend l'eau plus efficace et donc améliore la maniabilité.

On constate ainsi que la relation entre le dosage en fines et la maniabilité dépend aussi de la nature du sable et sa granulométrie. Les graphiques de la (figure1)



montrent l'effet différent des fines calcaires sur un sable alluvionnaire 0/4 et un sable de dune.

Pour le sable de dune, l'ajout de fines jusqu'à 200 kg/m<sup>3</sup> entraîne une chute de maniabilité, alors que pour le sable alluvionnaire (plus compact) on constate une chute continue.

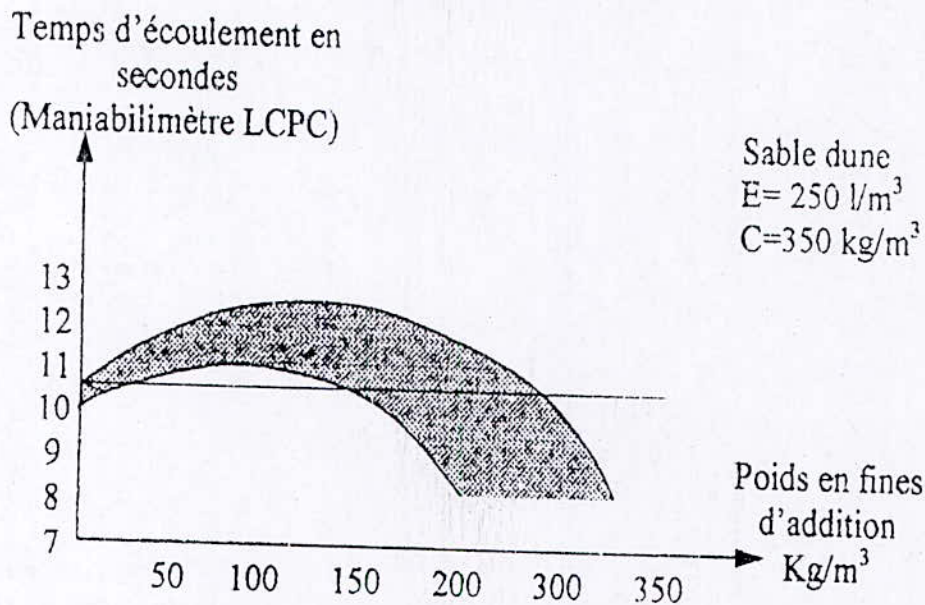
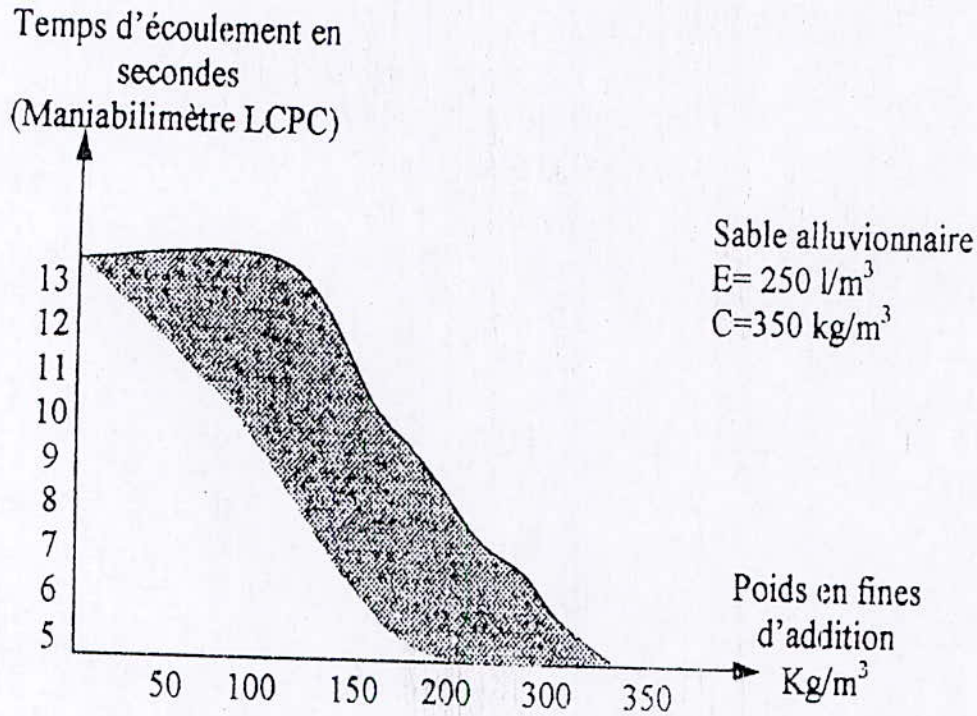


Figure 2 : Influence de la nature du sable sur la maniabilité  
(avec fines d'addition calcaire)

La granulométrie du sable influe sur les besoins en eau de mélange; plus le sable est riche en éléments grossiers plus la maniabilité s'améliore comme le traduit la figure (4) qui exprime une relation entre le module de finesse et la maniabilité.

### III.1.2. Granulométrie et résistance :

La figure (3) montre l'effet de la granulométrie sur la résistance :

- Pour des rapports E/C (eau/ciment) constants, on constate que l'effet du diamètre du plus gros granulat  $D_{max}$  est peu important et en tout état de cause, pas défavorable aux sables [1]. Cependant on constate que la maniabilité est très différente selon le béton. A titre d'exemple pour un  $D_{max}$  égale à 20mm, le béton de sable est très maniable, ce qui n'est pas le cas pour un diamètre  $D_{max}$  égal à 1,6 mm. Ce dernier cas nécessite une quantité d'eau supplémentaire, et par conséquent une chute de résistance plus ou moins importante.
- L'effet de la granulométrie sur la résistance apparaît plus clairement à des dosages en ciment constants.
- Chaque fois que le diamètre maximal  $D_{max}$  diminue, il faut plus d'eau pour garder la même maniabilité ce qui fait chuter implicitement la résistance. Dans le cas du béton de sable ( $D_{max} < 5\text{mm}$ ), et pour minimiser la chute de résistance, on prévoit l'utilisation d'un Adjuvant plastifiant réducteur d'eau.

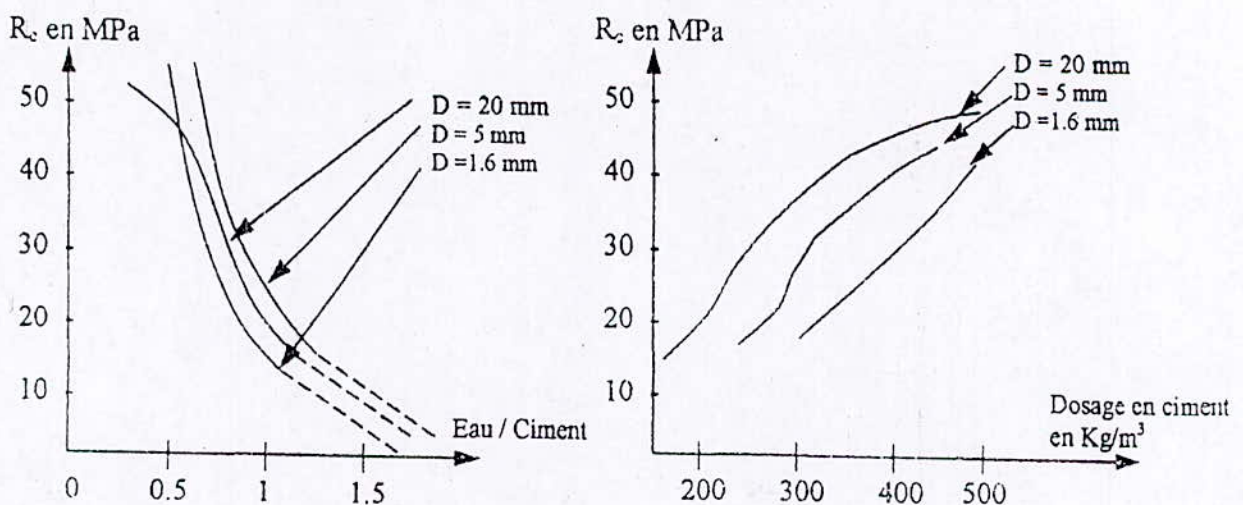


Figure 3 : Effet de la granularité sur la résistance.



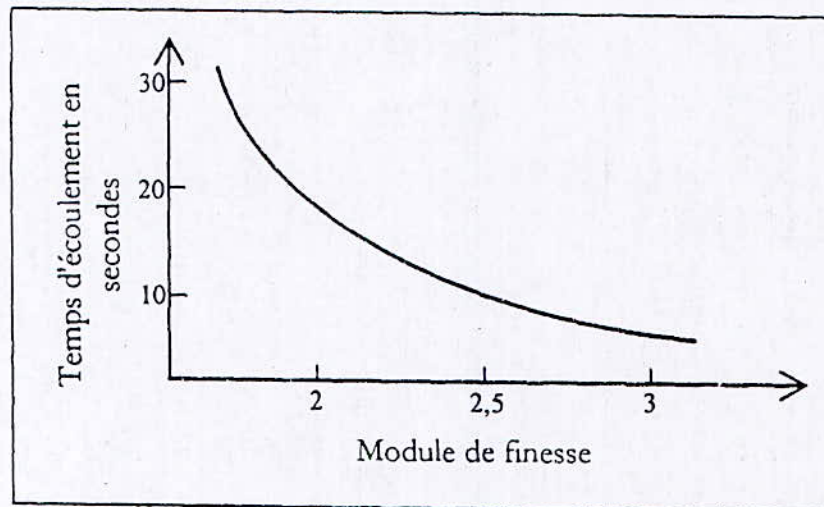


Figure 4 : la maniabilité en fonction du module de finesse

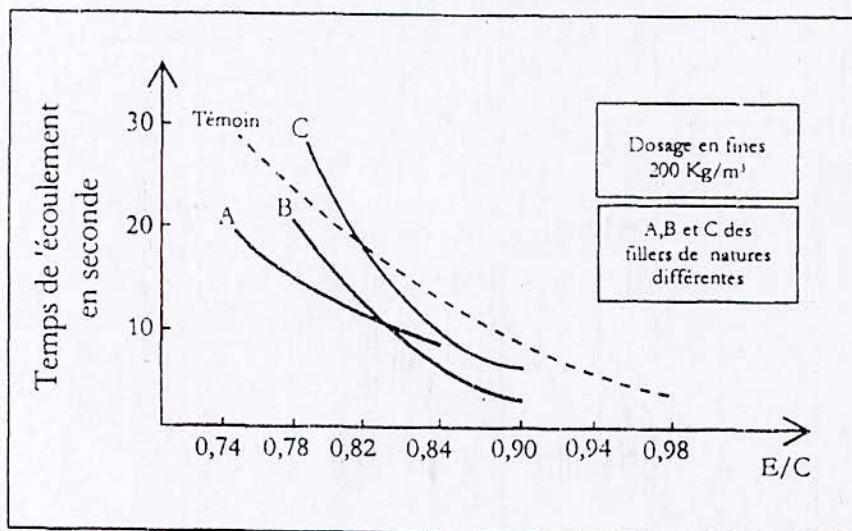


Figure 5 : Influence de la nature des fines sur la maniabilité

## III.1.3. La finesse des fines d'addition :

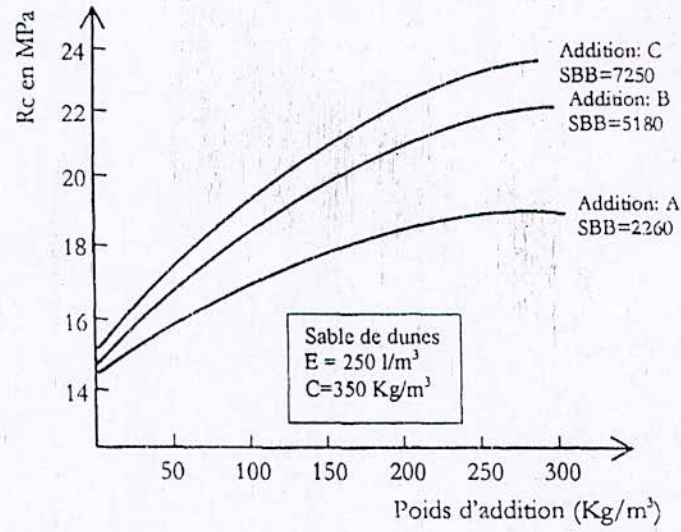


Figure 6 : effet du dosage et de la finesse de l'addition sur la résistance

## III.1.4. La nature de fines l'addition :

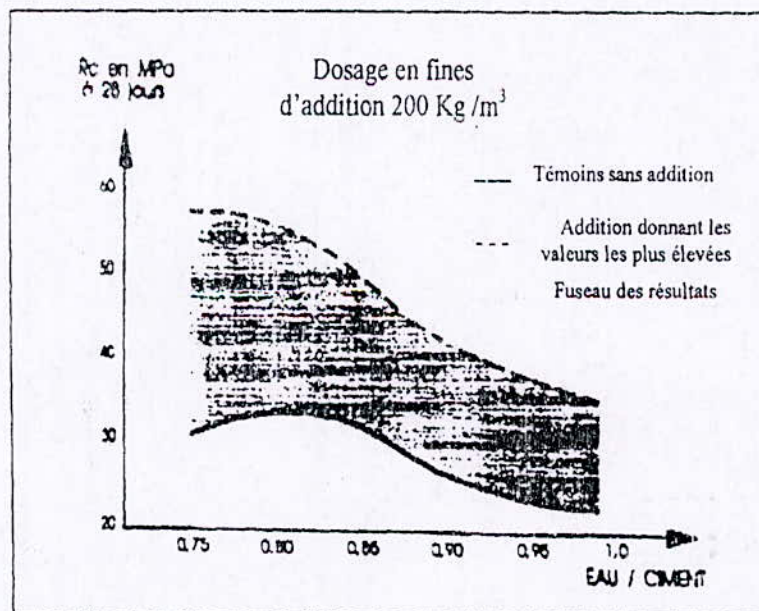


Figure 7: influence de la nature de l'addition sur le niveau de résistance



## III.1.5. Adhérence aux armatures :

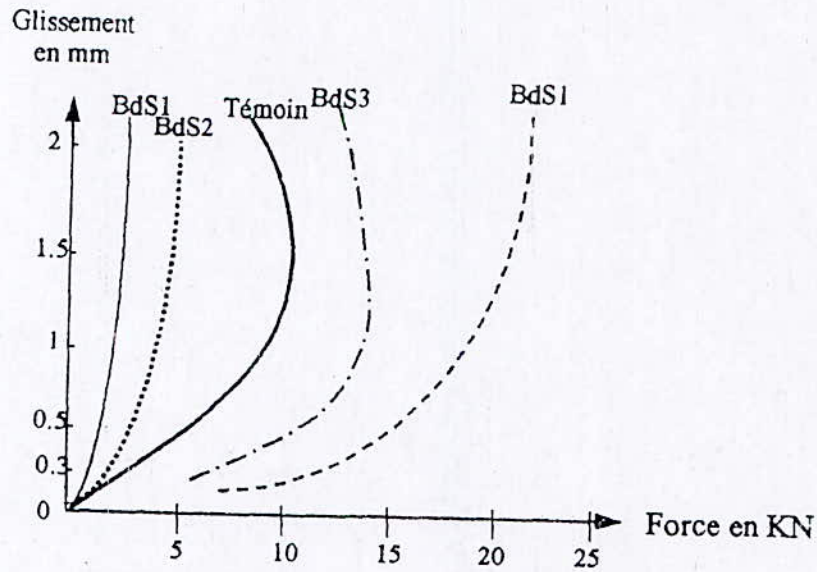


Figure 8 : variation de l'adhérence d'une armature en fonction formulation

Dans le cas des petites déformations (partie initiale), on constate que la contrainte correspondante au même niveau de déformation (50 microns) est d'autant plus forte que la résistance en traction du béton de sable est élevée. Le phénomène d'adhérence observé dans le béton de sable est pratiquement identique à celui des bétons traditionnels (contrainte ultime varie de 30 à 60 bars), alors qu'on peut dire que l'association béton de sable-acier engendre une adhérence suffisante entre les deux matériaux, ceci permet d'envisager l'utilisation du béton de sable comme béton de structure.

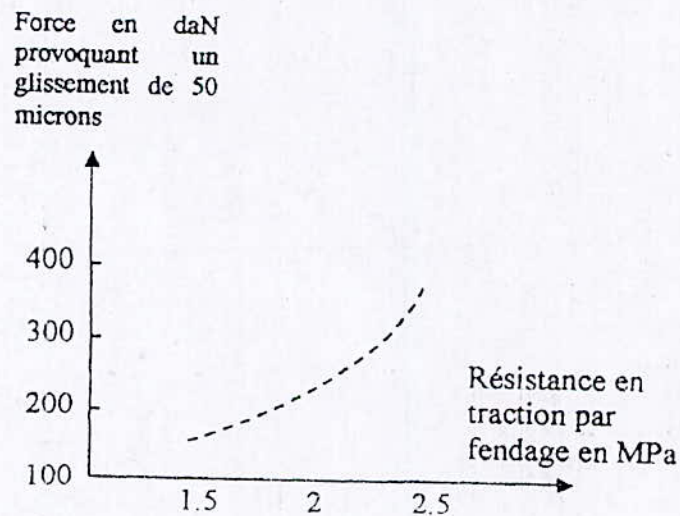


Figure 9 : Influence de la résistance en traction du béton de sable sur l'adhérence des armatures

## III.1.6. Durabilité des bétons de sable :

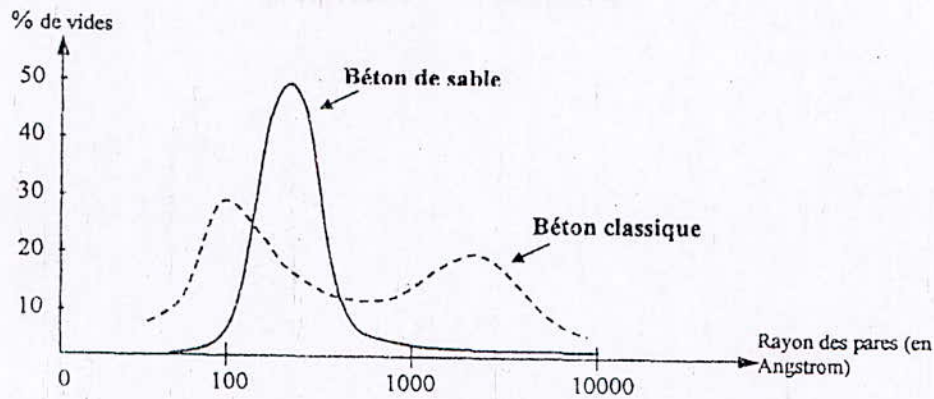
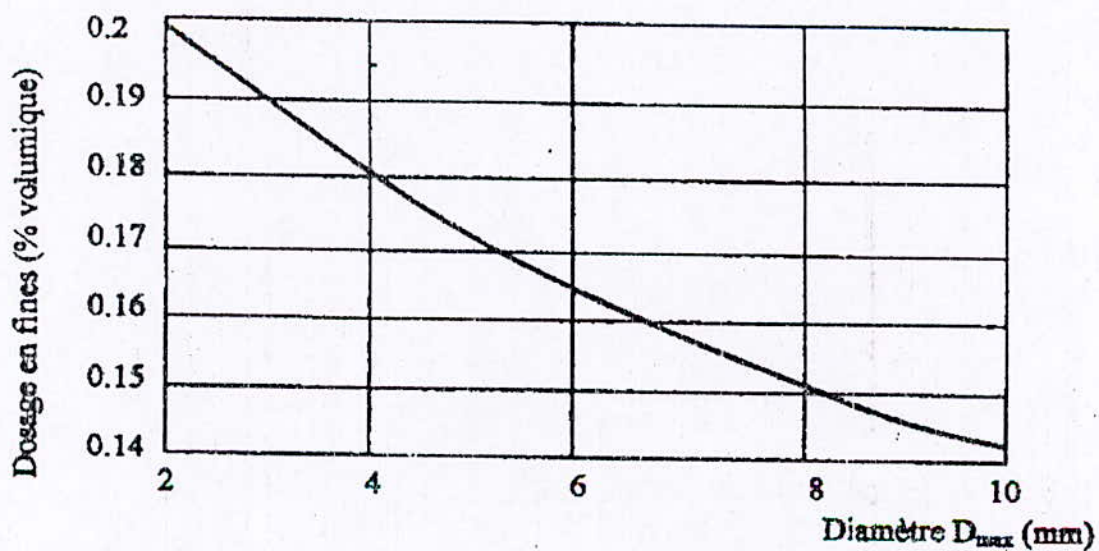


Figure 10 : courbe de distribution de la porosité en fonction des rayons des pores

La perméabilité à l'eau est du même ordre de grandeur que celle du béton traditionnel ; quant à la perméabilité à l'air, elle conduit à des résultats globalement inférieurs ou comparables, ces résultats entrent dans le cadre du projet SABLOCRETE qui contribue à l'étude du comportement des bétons de sable vis-à-vis de la durabilité. Ils ne sont pas généralisés à toutes les formulations de béton de sable mais plutôt à des bétons de sable correctement formulés. C'est-à-dire pour lesquels il y a eu optimisation des dosages en fines d'addition et en ciment. Dans ces conditions le comportement est très satisfaisant et même excellent.

## III.1.7. Les méthodes de formulation :

## III.1.7.1. Dosage en fines d'un béton de sable :

Figure 11 : Influence du diamètre  $D_{max}$  du sable sur le dosage en fines.



## III.1.7.2. Dosage en eau d'un béton de sable :

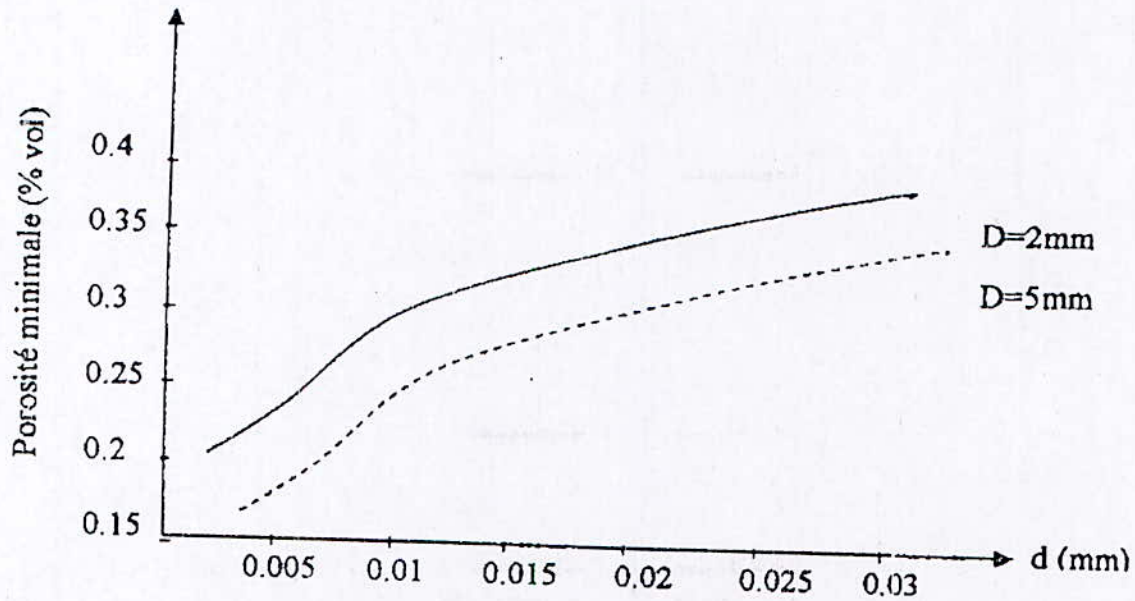


Figure 12: Influence de la dimension  $d$  sur la porosité minimale du béton pour deux tailles  $D$  du sable.

On remarque que la porosité minimale d'un mélange granulaire varie considérablement avec son étendue granulaire, mais cette porosité est décomposée en un volume d'eau ( $e$ ) et un volume des vides ( $v$ ).

En pratique, confectionner un béton avec les strictes quantités d'eau conduit à une mauvaise ouvrabilité ; la figure (13) nous montre la relation entre l'ouvrabilité et le dosage en eau.

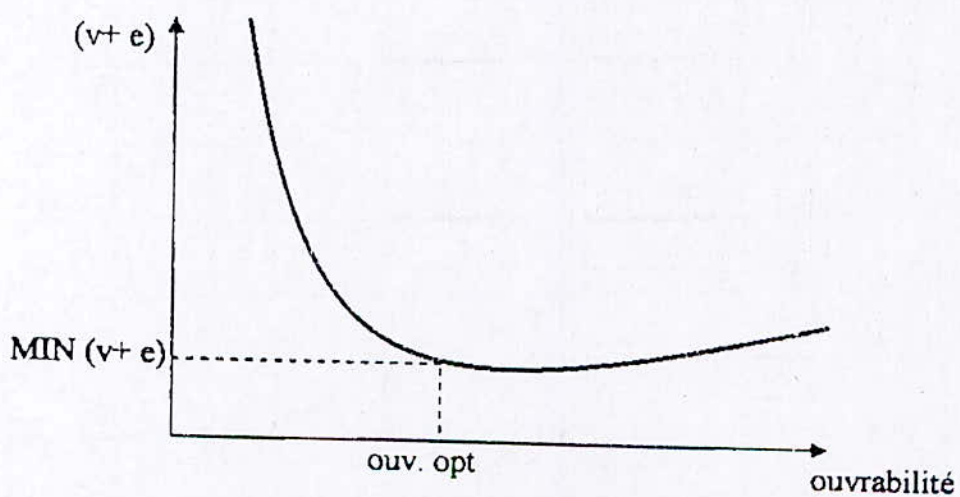


Figure 13: Relation entre l'ouvrabilité et le dosage ( $e + v$ ) d'une matrice pour une mise en oeuvre donnée.

## III.1.7.3. Estimation de la résistance en compression :

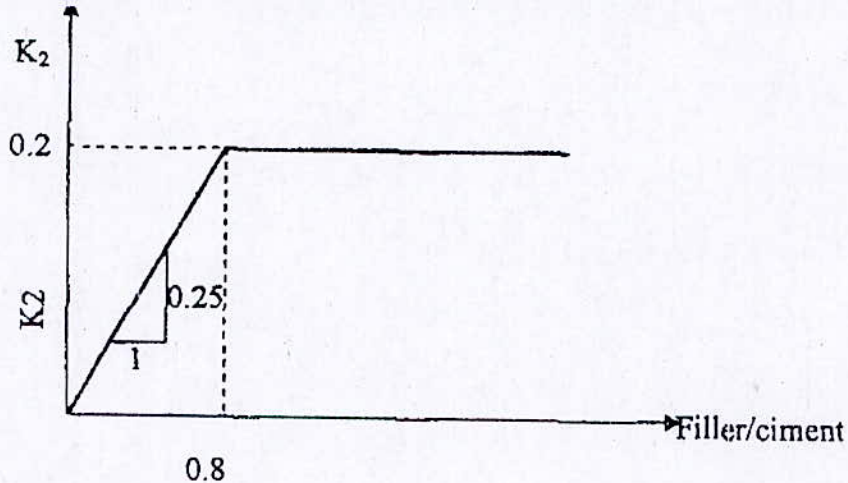


Figure 14 : Coefficient d'activité du filler calcaire (modèle).

$$R_b = \frac{K_f \times R_c}{\left(1 + \frac{3.1(e+v)}{c(1+K_1+K_2)}\right)^2}$$

$K_f$  : coefficient granulaire compris entre 4.5 et 5 ;

$R_c$  : classe vraie du ciment (MPa) ;

$E$  : dosage en eau total ( $l/m^3$ ) ;

$V$  : air piégé ( $l/m^3$ ) ;

$C$  : dosage en ciment ( $kg/m^3$ ) ;

$R_b$  : résistance à la compression du béton à 28 jours (MPa).

Avec :

$$K_1 = K_{cv} (CV/C) + K_{fs} (FS/C);$$

$$0.2 < K_{cv} < 0.4 \quad 2 < K_{fs} < 3.3 \quad K_1 \leq 0.5$$

$$K_2 = K_{fil} (Fil/C);$$

$$0 < K_{fil} \leq 0.4$$

$$K_1 < 0.2$$

$K_1$  : coefficient pouzzolanique



$K_2$  : coefficient d'activité du filler calcaire.

$K_{cv}$ ,  $K_{fs}$ ,  $K_{fil}$  : coefficients d'équivalence en ciment des différentes additions en fines.

CV, FS, FIL : dosage en cendres volantes, fumée de silice et tiller calcaire ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

### III.2. Résultats ENP : (laboratoire de construction et d'environnement LCE). [3]

#### III.2.1. Formulation des bétons de sable :

Comme nous avons dit auparavant la formulation consiste à trouver les meilleures proportions des différents constituants après s'être assuré de leur compatibilité, puis évaluer à l'aide des tests prédictifs le comportement du béton de sable.

Le choix de ces compositions est fait à partir des deux critères principaux du béton de structure :

- La maniabilité.
- la masse volumique (MV).

#### ➤ la maniabilité :

Pour apprécier cette caractéristique nous avons utilisé le maniabilimètre LCPC cité précédemment. On doit confectionner un béton de sable dont le temps d'écoulement sur cet appareil est compris entre 7 et 10s, ce qui correspond à un béton plastique.

#### ➤ la masse volumique :

Il s'agit ici de la masse volumique du béton frais déterminée juste après avoir obtenu la maniabilité recherchée. De la même manière que pour les autres matériaux, on pèse une quantité de béton de sable frais occupant un volume connu. La masse volumique s'obtient par le rapport de la masse sur le volume.

#### Confectionnement du béton :

Le béton doit être soigneusement confectionné et correctement mis en place pour que les résultats obtenus soient significatifs.

Le confectionnement comporte deux étapes principales :

➤ **Le malaxage :**

Le but de cette opération est d'homogénéiser le béton et lui donner une bonne cohésion, pour cela on commence à malaxer le ciment et le sable à sec suffisamment pour pouvoir entourer les grains de sable par le ciment, ensuite l'eau mélangée avec l'adjuvant est introduite dans le mélange à l'intérieur d'un malaxeur à mortier de 5L.

Les constituants du béton seront malaxés d'avantage jusqu'au mouillage complet des grains, Cette procédure a été adaptée pour toutes les compositions réalisées.

➤ **Le serrage :**

La mise en place du béton a été effectuée grâce à une vibration moyenne par piquage pour réduire au maximum le pourcentage de vides à l'intérieur des bétons et augmenter la compacité.

**Les éprouvettes utilisées :**

Nous avons utilisé au cours de cette étude deux types d'éprouvettes :

1. Les éprouvettes prismatiques de dimensions (4x4x16) cm pour toutes les compositions afin de mesurer les résistances à 7 et 28 jours

- Les résistances à la compression sont obtenues par l'écrasement des cubes de dimensions (4x4x4) cm obtenus par découpage à la tronçonneuse des prismes (4x4x16) cm, alors que pour les résistances à la traction nous avons utilisé les éprouvettes telles qu'elles sont, et on les a écrasées selon l'essai de traction par flexion.

2. Les éprouvettes cubiques de dimensions (10x10x10) cm<sup>3</sup> sont utilisées pour certaines compositions qui présentent des intérêts particuliers (compositions optimales). Ces éprouvettes sont en suite soumises à des essais d'extensométrie, permettant la mesure du module d'élasticité (module de Young)



### III.2.2. Formulation de base (100% sable de dune)

La composition de base sert comme témoin. Elle comporte le ciment, l'eau de gâchage, un adjuvant plastifiant et le sable de dune.

#### ♦ Dosage en ciment :

Dans le cas des bétons de sable, nous avons vu que le ciment qui convient le mieux est le ciment artificiel CPA, mais ceci n'exclut pas l'utilisation d'un ciment composé CPJ avec une indication particulière.

- le ciment CPJ est divisé en deux fractions pondérales;

85% du poids de CPJ est considéré comme un CPA, et 15% est considéré comme des fillers calcaire.

Cette division conduit à une majoration de la classe de ciment de 18%.

Pour obtenir un béton de sable dosé à 320 kg/m<sup>3</sup> en ciment CPA, on doit chercher le dosage en CPJ correspondant

$$[CPA] = 0.85 \times [CPJ] \Rightarrow [CPJ] = \frac{[CPA]}{0.85} = \frac{320}{0.85}$$

$$[CPJ] = 376.4 \text{ kg/m}^3$$

On prend un dosage en CPJ égale à 375 kg/m<sup>3</sup>

Sachant que la masse volumique absolue de ciment est égale à 3145 kg/m<sup>3</sup>, alors son dosage volumique est égal à 119.3 l/m<sup>3</sup>.

$$[CPJ] = 119.3 \text{ l/m}^3$$

Les 15% de ciment restant sont considérés comme des fines calcaires, leur dosage est déterminé comme suit

$$[\text{Fillers calcaire}] = 0.15 \times [CPJ]$$

$$[\text{Fillers calcaire}] = 56.25 \text{ kg/m}^3$$

#### ♦ Dosage en adjuvant :

Le dosage en adjuvant est pris égal à 0,4% du poids du ciment pour permettre une réduction de l'eau de gâchage de 10%

$$[adj] = \frac{0.4 \times 375}{100} = 1.5 \text{ Kg/m}^3$$

$$D = 1.18 \Rightarrow MV_{adj} = 1180 \text{ Kg/m}^3$$

D'où le dosage volumique en adjuvant est égal à  $1.3 \text{ l/m}^3$

$$[adj] = 1.3 \text{ l/m}^3$$

♦ Dosage en eau :

Le dosage en eau est fonction du dosage en ciment. L'expérience des praticiens, nous donne les valeurs suivantes :

-  $220 \text{ l/m}^3$  pour un dosage en ciment de  $350 \text{ kg/m}^3$

-  $250 \text{ l/m}^3$  pour un dosage en ciment de  $400 \text{ kg/m}^3$

L'estimation approximative du dosage en eau pour un dosage en ciment de  $375 \text{ kg/m}^3$  est de

$$235 \text{ l/m}^3$$

Cette quantité doit être révisée lors de la réalisation des gâchées surtout avec l'utilisation des adjuvants réducteurs d'eau

Le dosage en adjuvant utilisé permet de réduire l'eau de 10% donc le dosage en eau est égal à

$$211.5 \text{ l/m}^3$$

$$[Eau] = 211.5 \text{ l/m}^3$$

Cette quantité doit être versée par étapes jusqu'à l'obtention de la maniabilité recherchée.

♦ Dosage en air :

Un béton contient toujours un volume d'air. Dans le cas des bétons de sable, la teneur en air est de l'ordre 5 à 7%, on prend une valeur moyenne de 6%

$$[air] = \frac{6 \times 1000}{100}$$

$$[air] = 60 \text{ l/m}^3$$

♦ Dosage en sable :



Après avoir déterminé les valeurs du ciment, de l'eau, de l'adjuvant et d'air, le volume du sable s'obtient en complétant la formule d'un mètre cube

$$[\text{ciment}] + [\text{eau}] + [\text{adj}] + [\text{air}] + [\text{sable}] = 1000$$

$$[\text{sable}] = 607.9 \text{ l/m}^3$$

Sachant que la masse volumique absolue du sable est de  $2560 \text{ kg/m}^3$ .

Le dosage massique en sable est égal à  $1556.24 \text{ kg/m}^3$

Les résultats sur le maniabilimètre LCPC de cette composition en fonction de la quantité d'eau de gâchage sont donnés dans le tableau suivant :

**Tableau 1 : Maniabilité en fonction du dosage en eau**

Quantité d'eau en (l)	Maniabilité en (s)
200	53
210	36
211.5	34.5

On remarque que la quantité d'eau de gâchage calculée théoriquement n'est pas suffisante pour l'obtention de la maniabilité recherchée ; ceci est dû à la finesse des grains du sable, et donc une quantité supplémentaire d'eau est nécessaire pour mouiller toute l'interface entre grains et faciliter ainsi l'écoulement du béton.

Pour cela on doit corriger la formulation par l'équation itérative

$$S_1 = 1556,24 - (2144,24 - 2130,72) - 2560 \times 6 \times 10^{-3}$$

$$S_1 = 1527,36 \text{ kg/m}^3 ; \text{maniabilité égale } 27 \text{ s.}$$

$$S_2 = 1527,36 - (2269,5 - 2181) - 2560 \times 10 \times 10^{-3}$$

$$S_2 = 1413,26 \text{ kg/m}^3 ; \text{maniabilité égale } 15 \text{ s}$$

$$S_3 = 1413,26 - (2241,01 - 2173,51) - 2560 \times 5 \times 10^{-3}$$

$$S_3 = 1332,96 \text{ kg/m}^3 ; \text{maniabilité égale à } 9 \text{ s.}$$

La formule de base étant retenue, des essais de résistance à la compression ont été effectués à 7 et 28 jours, alors que pour la résistance à la traction, les essais sont effectués à 28 jours seulement.

Trois éprouvettes ont été testées à chaque essai et à chaque âge, et les résultats sont donnés dans le tableau ci-après :

Tableau 2 : Composition et caractéristiques de la formulation de base

Dosage des éléments (Kg/m <sup>3</sup> )				Maniabilité (s)	$\rho_{th}$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_a$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$R_c$ (MPa)		$R_t$ (MPa)
Ciment	Adjuvant	Eau	Sable				7j	28j	
375	1.5	232.5	1332.96	9	2221.95	2084.19	8.03	16.73	1.24

Où:

$\rho_{th}$  : masse volumique théorique.

$\rho_a$  : masse volumique apparente.  $R_c$  : Résistance à la compression.

$R_t$  : Résistance à la traction.

Par rapport aux études précédentes sur le béton de sable, les caractéristiques de cette formulation sont considérables car elles ne sont atteintes que par la réalisation de plusieurs gâchées, alors que le recours aux méthodes de formulation exposées dans le chapitre II a permis de réduire considérablement le nombre de gâchées, mais ses caractéristiques restent insuffisantes. Pour corriger cette insuffisance et atteindre les objectifs recherchés, on s'efforcera à avoir une granulométrie plus étalée et plus continue.

### III.2.3. Première série d'essais :

Dans cette phase, le sable de carrière est employé comme correcteur granulaire à des pourcentages différents. La démarche consiste à déterminer le pourcentage nécessaire en correcteur afin d'atteindre les résistances souhaitées. La maniabilité est toujours la base de l'acceptation des compositions.



Les pourcentages en correcteur varie entre 10% et 50% par pas de 10%. Les compositions réalisées sont données dans le tableau suivant :

Tableau 3 : Compositions du béton de sable avec ajout de sable concassé

Compositions	BS10	BS20	BS30	BS40	BS50
Constituant(kg)					
Ciment	375	375	375	375	375
Adjuvant	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Sable de dune	1199,69	1066,39	933,10	799,79	666,49
Sable concassé	141,11	282,22	423,33	564,44	705,55
Eau	227,82	220,52	219,19	218,5	217,84

Les résultats des essais et les analyses effectués sur ces compositions sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau 4 : Caractéristiques des différentes compositions avec ajout du sable concassé

Caractéristiques composition	$\rho_{th}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_a$ (kg/m <sup>3</sup> )	Maniabilité (s)	$R_c$ (MPa)		$R_t$ (MPa)
				7j	28j	
BS10	2237,83	2114,75	8	9,90	18,88	1,37
BS20	2258,23	2150,05	7	12,04	20,28	1,40
BS30	2268,58	2170,80	9,5	12,71	21,76	1,84
BS40	2278,7	2186,87	10	14,45	23,98	1,93
BS50	2288,78	2202,03	7,5	14,6	24,5	1,98

Les graphes représentant l'évolution des compacités et les résistances mécaniques en fonction du dosage en correcteur sont donnés ci-après :



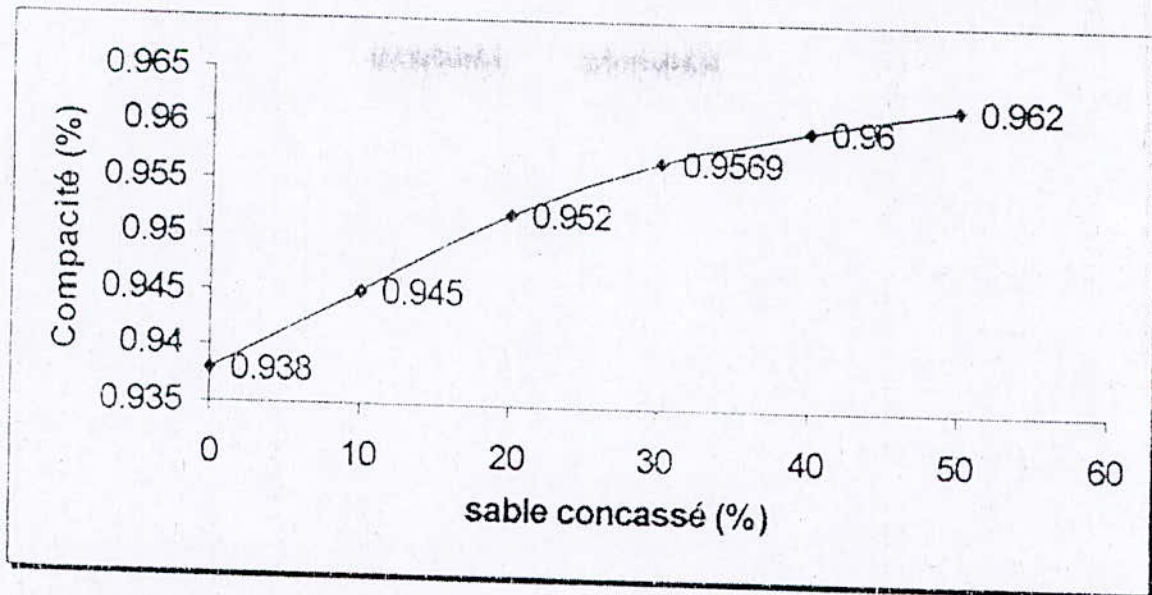


Figure 15 : Evolution de la compacité en fonction du dosage du sable concassé

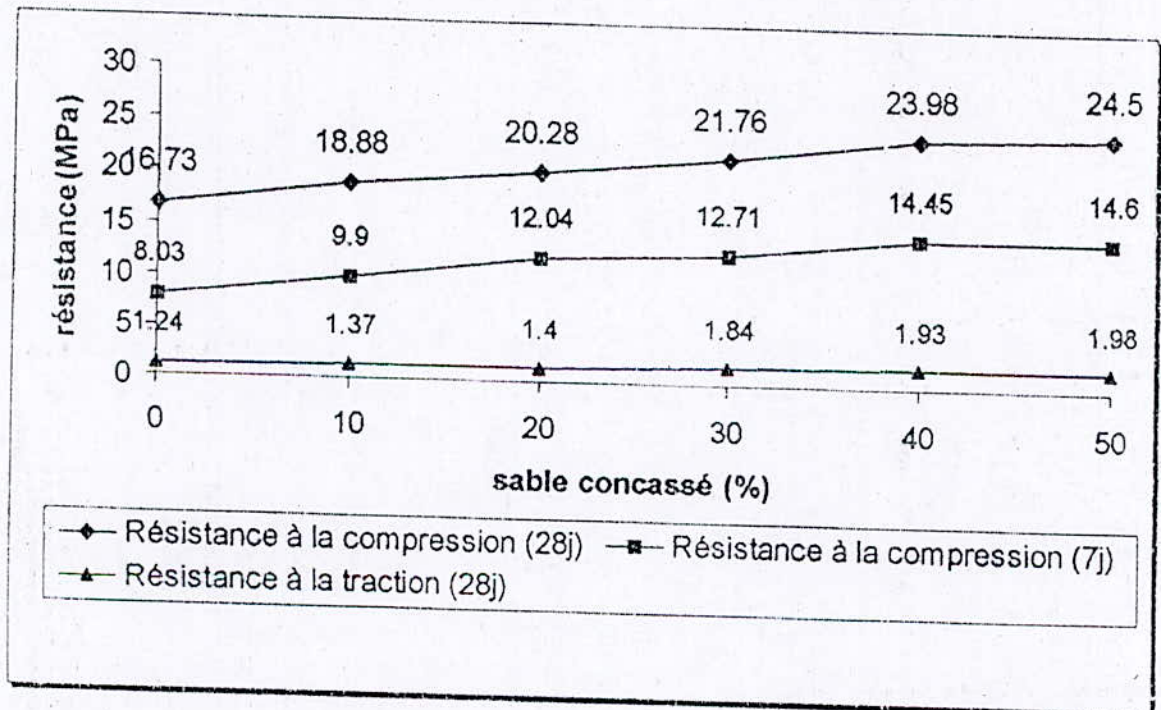


Figure 16 : Evolution des résistances en fonction du dosage en sable concassé

#### Interprétation des résultats :

a) En faisant varier le pourcentage de sable concassé de 0 à 50% par pas de 10% on remarque que la compacité du béton augmente avec l'augmentation du pourcentage du correcteur. Ceci s'explique par la granulométrie un peu étalée du sable correcteur et sa teneur en fines ; la granulométrie devient plus étalée, ce qui



favorise le réarrangement des grains alors que les fines vont occuper les vides intergranulaires du sable de dune et augmenter la compacité par diminution du volume des vides. Cette augmentation est plus visible entre 0 et 30% au pourcentage élevé des vides à remplir qui devient de plus en plus limité, aussi la raison pour laquelle la masse volumique a augmenté.

b) On remarque que les résistances s'améliorent avec l'augmentation des pourcentages de sable concassé. Cela s'explique par l'existence de fines qui favorise l'arrangement des grains et le contact inter-granulaire, ce qui a pour conséquence la diminution d'eau de gâchage et par suite une augmentation de la résistance ( $E/C$  diminue). D'autre part, l'aspect anguleux que présentent les grains de sable concassé favorise considérablement le frottement entre grains et améliore de ce fait la cohésion inter-granulaire.

En effet cette amélioration est prévisible suite à la remarque précédente sur l'augmentation de la compacité facteur étroitement lié à la résistance.

L'ajout de sable concassé à 50% a permis d'obtenir un gain de résistance de l'ordre de 47,67%, qui est un gain très satisfaisant par rapport aux objectifs recherchés.

#### III.2.4. Deuxième série d'essais :

Dans cette série d'essais, on procède à la correction par l'apport de deux matériaux correcteurs, le sable concassé et le gravillon, en jouant sur leur pourcentage, alors que le dosage total en correcteur est maintenu à 50%.

Tableau 5 : Les compositions avec ajout du gravillon

compositions	BSG10	BSG20	BSG30	BSG40	BSG50
Constituant(kg)					
Ciment	375	375	375	375	375
Adjuvant	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Sable de dune	666,49	666,49	666,49	666,49	666,49
Sable concassé	564,44	423,33	282,22	141,1	-----
Gravillon	137,46	274,93	412,39	549,86	687,32
Eau	218,36	216,23	215,63	214,94	214,56



Les résultats des essais sur ces compositions sont donnés dans le tableau ci-après :

Tableau 6 : Caractéristiques des différentes compositions avec ajout du gravillon

Caractéristiques composition	$\rho_{th}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_a$ (kg/m <sup>3</sup> )	Maniabilité (s)	$R_c$ (MPa)		$R_t$ (MPa)
				7j	28j	
BSG10	2283,91	2212,42	9	9,4	24,18	2,03
BSG20	2282,77	2211,50	8	15,3	29,78	2,47
BSG30	2279,68	2218,13	10	16,71	32,45	2,89
BSG40	2276,20	2200,40	8,5	16,55	31,32	2,74
BSG50	2272,57	2159,46	9	14,89	27,03	2,52

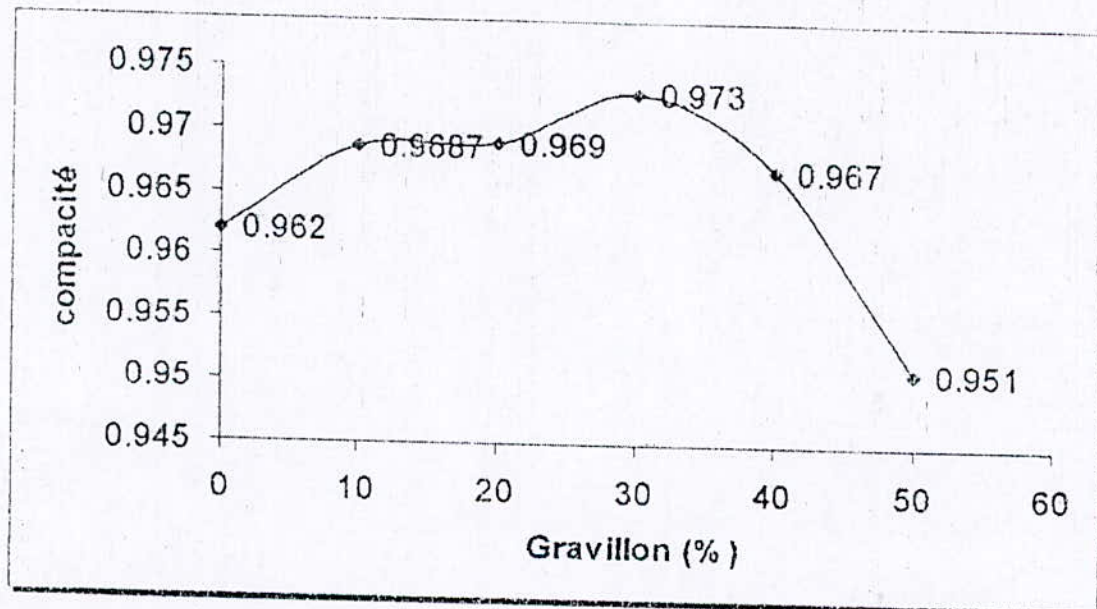


Figure 17 : Relation compacité dosage en gravillon



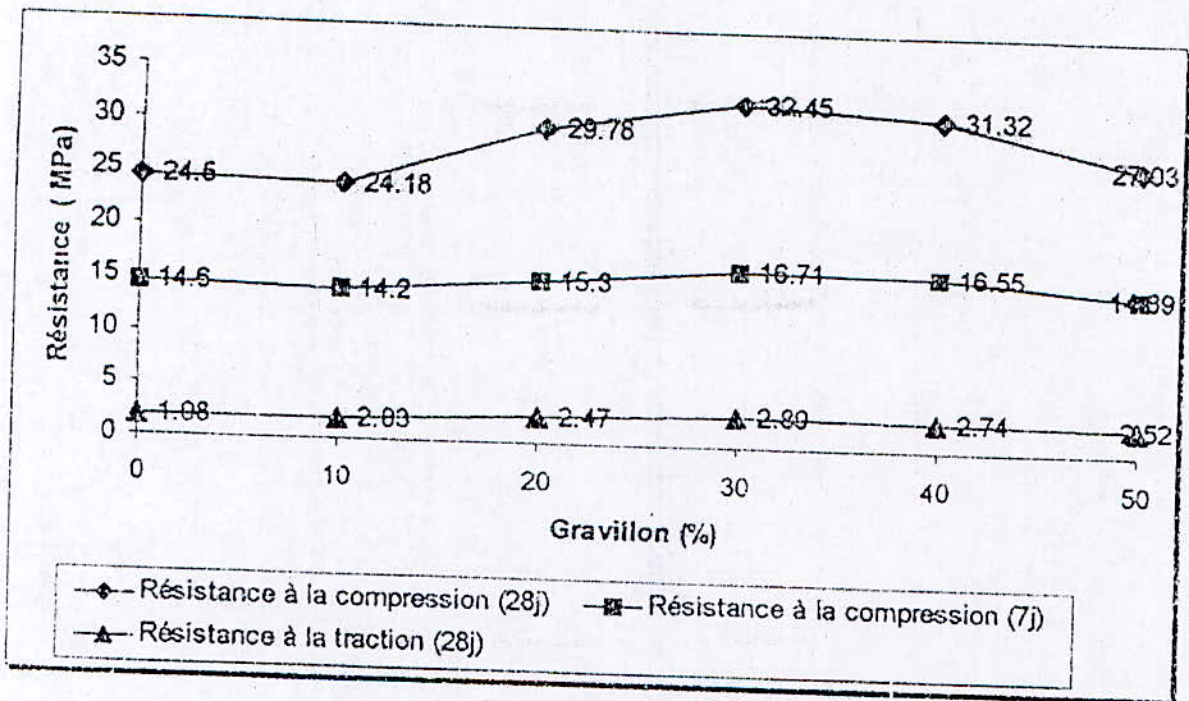


Figure 18: Relation résistance dosage en gravillon

**Interprétation des résultats :**

a) En faisant varier le pourcentage des deux matériaux correcteurs employés, on s'aperçoit que la relation compacité fonction du dosage en gravillon a une allure parabolique qui présente un optimum correspondant à 30% du gravillon.

Pour la partie gauche de la courbe, c'est-à-dire un dosage en gravillon inférieur à celui de l'optimum, on remarque que la compacité augmente. Ceci est attribué au gravillon qui fait étaler la granulométrie d'avantage et les grains des différents constituants trouvant une grande facilité à ce réarranger d'une manière plus compacte (ferme).

Pour le point correspondant à 30% de gravillon, on remarque la plus grande compacité (97,3%). Ceci permet de dire que le mélange est optimisé dans son squelette, c'est-à-dire que les proportions des différents constituants sont en bon rapport.

Les vides les plus gros créés par le gravillon sont occupés par les grains du sable de dune alors que les fines provenant du sable concassé sont suffisantes pour occuper les vides inter-granulaires des deux sables limitant de ce fait leur pourcentage au maximum.

Pour la partie droite de la courbe, c'est-à-dire un dosage en gravillon supérieur à 30%, on remarque que la compacité diminue d'une manière significative. Ceci est dû au pourcentage retranché du sable concassé, qui est un peu important.

En effet, la diminution du sable concassé entraîne une diminution des pourcentages des fines et une partie des vides inter-granulaires des sables reste inoccupée, ce volume des vides est à l'origine de la diminution de la compacité.

b) En traçant la courbe reliant les résistances en fonction du dosage en gravillon. On remarque que la courbe est aussi parabolique présentant le même point précédent comme pique (30% de gravillon).

Pour la partie gauche de cette courbe correspondant à un dosage en gravillon inférieur à 30%, le gravillon fait étaler l'étendu granulométrique, facilitant le réarrangement des grains et met en évidence l'effet du diamètre maximal ( $D_{max}$ ), dont le béton tire une part de sa résistance. Cependant, le pourcentage du sable concassé est considérable pour assurer le frottement entre les grains et améliorer la



cohésion inter granulaire, et le mélange acquis ainsi de plus en plus de résistance.

Au-delà de 30% de gravillon, on remarque une chute de résistance, de même que la compacité. Ceci est dû au manque des éléments anguleux qui deviennent de plus en plus insuffisants pour assurer le frottement entre grains et diminue dès lors la cohésion inter-granulaire d'où une chute de résistance.

Pour le point 30% du gravillon on obtient l'optimum de résistance, ceci est dû à la contribution de toutes les performances des éléments constituant le béton suite à leurs proportions convenables ainsi que leur affinité.

Le pourcentage du sable concassé est voisin de celui du gravillon. Le sable concassé assure pour sa part le frottement inter-granulaires, alors que le gravillon étale l'étendu granulométrique et facilite l'arrangement des grains. Ces deux facteurs favorisant la résistance sont disponibles dans cette composition, ce qui traduit la bonne résistance obtenue.

#### **Choix de la composition optimale :**

Sur la base des résultats des essais effectués, on constate clairement que la composition optimale est BSG30 qui présente les meilleures résistances. Si on se réfère aux objectifs fixés d'avance, on remarque que plusieurs compositions sont satisfaisantes. Pour un intérêt économique et écologique nous avons jugé que la formule BS50 est aussi intéressante du fait qu'elle présente une résistance acceptable.

*CHAPITRE : IV*

*CORRECTION  
GRANULOMÉTRIQUE  
DES BÉTONS DE SABLE*



## IV. correction granulométrique des bétons de sable

### IV.1. Introduction :

La granulométrie et l'angularité du sable de base peuvent ne pas lui assurer des caractéristiques suffisantes pour son emploi dans les bétons hydrauliques. Pour satisfaire les spécifications du béton et conférer au mélange après durcissement une structure fermée, c'est-à-dire une compacité proche de la valeur optimale, on doit procéder à une correction granulométrique des sables présentant des pourcentages de vides élevés, la solution est de chercher une granulométrie aussi étalée et continue que possible.

L'apport du ciment constitue une première correction qui sera complétée par l'apport d'autres matériaux naturels ou artificiels.

La technique souvent employée pour les bétons de sable, que ce soit le sable utilisé concassé ou naturel, est celle qui consiste à corriger la porosité du sable par l'adjonction de fines capables d'occuper les vides inter-granulaires. Cependant dans certains cas de sables particuliers, une correction par l'apport de sable concassé s'impose.

### IV.2. Correction granulométrique par l'apport d'un sable concassé :

#### IV.2.1. Correction des sables pauvres en fines :

Pour les sables contenant moins de 10% de fines, la correction est généralement réalisée avec un sable broyé de granularité (0/2) mm ou (0/5) mm contenant jusqu'à 30% de fines, les caractéristiques de ce sable peuvent normalement être adaptées et doivent être définies selon le sable à corriger dans le but de déterminer le dosage en correcteur (pour un sable fin dosé en dosage habituel en ciment ce mélange doit être amélioré par l'apport d'un sable broyé à un dosage pouvant atteindre 30% de fines).

#### IV.2.2. Correction des sables mal gradués :

Les sables mal gradués peuvent être corrigés par l'apport d'un autre sable concassé.



C'est le cas de certains sables provenant de l'écrêtage de graves naturelles mal graduées qui sont un mélange de sable roulé (0/6,3) mm et de gravillons de tailles moyennes (10 à 30mm) en faibles proportions ; ils peuvent être corrigés par l'incorporation, dans le sable roulé (0/6,3) mm obtenu par criblage, du sable artificiel obtenu par concassage des gravillons.

#### IV.3. Correction par l'ajout de gravillons :

C'est une autre manière de correction granulométrique plus intéressante dans le cas du béton de sable et qui a fait l'objet d'une investigation particulière donnant des résultats fascinants. En effet, l'utilisation du gravillon pour corriger la compacité de sable est une éventualité envisagée dans le cas général, mais l'idée d'incorporer ce matériau doué de caractéristiques dans une composition du béton de sable peut surprendre et paraître contradictoire avec la volonté d'utiliser ce type de béton. Alors qu'un tel ajout ne modifie pas les propriétés spécifiques du béton de sable et le comportement reste le même du fait que le dosage adapté en gravillon soit faible et ne forme pas un squelette structurel. Il s'agit d'un béton de sable chargé. D'autre part une telle charge améliore sensiblement certaines performances du béton, particulièrement le fluage et le module d'élasticité (caractéristiques très importantes pour les éléments porteurs de structure).

Il paraît donc tout à fait clair que la nature et les propriétés des gravillons sont à l'origine de cette amélioration.

Sans prescriptions particulières, les gravillons adaptés pour le béton de sable sont de mêmes propriétés que ceux utilisés dans les bétons traditionnels.

##### IV.3.1. Spécifications sur gravillons pour béton hydraulique :

Les gravillons sont utilisés dans les bétons de ciment comme éléments d'ossature destinés à donner plus de compacité à l'ensemble; ils permettent également d'économiser le ciment. Pour satisfaire ces rôles, ils doivent répondre à certaines exigences :

###### ♦ La forme du gravillon :

La forme du gravillon est un élément important au point de vue des caractéristiques d'utilisation. En pratique on distingue trois formes principales :



- Les gravillons cubiques (ou cuboïdes) à forme ramassée.
- Les gravillons en plaquettes.
- Les gravillons en aiguilles.

Les gravillons en plaquettes sont, peut être, les éléments les plus résistants au point de vue intrinsèque, puisqu'ils ne sont pas fragmentés lors du concassage malgré une forme peu propice à la résistance.

Signalons d'ailleurs, que la forme des grains de gravillon définie comme ci-dessus n'est pas suffisante: il y'a également des questions de forme en surface outre les questions en volume.

En définitive, les gravillons roulés sont plus recherchés, par ce qu'ils donnent des produits plus maniables, un meilleur arrangement des grains et on obtient donc une meilleure compacité effective.

#### ♦ La propreté des gravillons :

Les gravillons destinés à la fabrication des bétons doivent être rigoureusement propres, c'est-à-dire dépourvus de gangues superficielles, ou même une pellicule de matière pouvant nuire à l'adhérence, en particulier s'il s'agit d'argile. Aucune autre poussière ou matière étrangère ne doit former un film continu à moins que ce film ne favorise l'adhésivité sauf la poussière de matériau lui-même « filler », peut être tolérée si la quantité est faible et si elle ne provient pas d'éléments altérés.

En général, les matériaux de rivière ou de ballastière sont propres, par contre les matériaux de carrière peuvent laisser à désirer à ce point de vue.

#### ♦ Adhérence et cohésion des gravillons :

La propreté des gravillons est une condition nécessaire pour une bonne adhérence, mais ce n'est nullement une condition suffisante. L'adhésivité est une question d'affinité naturelle ou créée de gravillon pour les liants, elle varie avec la nature, la composition, l'origine et l'altération éventuelle des roches d'où sont tirés les gravillons.

L'adhésivité dépend partiellement du grain de la surface et de sa rugosité, mais beaucoup aussi de la fraîcheur de la cassure et bien entendu de sa nature chimique.



Pour les bétons de ciment, l'adhérence dépend aussi de l'affinité en général chimique de la paroi des grains pour les produits d'hydratation du ciment, on parle dans ce cas d'affinité d'ordre chimique que la liaison est d'ordre épitaxique à l'interface ; c'est le cas par exemple des sables de laitier granulés, qui donnent plus rapidement une adhérence meilleure et donc des bétons plus résistants si la surface des grains a été décapée par attrition.

On se contente d'éliminer, à priori, des éléments réputés trop tendres par leur nature ou leur origine, mais cette méthode qualitative n'est pas toujours sûre, certains granites à gros grains par exemple donnent souvent des résistances insuffisantes, alors que certains calcaires durs ne sont pas à mépriser.

♦ **La dureté des gravillons :**

Pour la dureté des gravillons; il faut savoir qu'elle est étroitement liée à la fois, à sa résistance à la compression et à l'angle de frottement interne de la pierre auxquels se joint la résistance à l'écrasement du gravillon.

Ces paramètres ainsi que d'autres, plus ou moins importants, permettent de faire une opinion sur la fragilité ou la dureté des gravillons par rapport à des matériaux types.

Notant que d'autres caractéristiques liées à la nature du gravillon ont des influences non négligeables sur la résistance du mélange.

**IV.3.2. Principaux essais sur gravillons :**

En plus des essais courants d'identification employés pour les sables, s'ajoutent deux autres essais principaux, servant à déterminer les caractéristiques de résistance du gravillon.

♦ **Essai Micro-Deval:**

La résistance à la fragmentation et à l'usure est généralement caractérisée par l'essai micro-Deval. Dans un cylindre standard de 20cm de diamètre et 34 cm de longueur, on introduit 50 pièces écrasées de la roche en cause et pesant en total (500grammes). Le cylindre effectue 10.000 révolutions à 30 tours à la minute autour d'un axe faisant



un angle de 32° avec l'axe du cylindre.

Le résultat de l'essai consiste à mesurer le coefficient Micro-Deval, noté MD, par la formule

$$MD = 100 \times \frac{500 - P}{500}$$

Où P : La masse des refus au tamis 1,6mm étuvée à 105°C jusqu'à une masse constante.

♦ Essai Los-Angeles :

L'essai consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1,6 mm produits en soumettant le matériau aux chocs des boules d'acier. Il s'agit de placer dans un cylindre à axe horizontal de 70 cm de diamètre et 50 cm de longueur les granulats d'essai et les boules d'acier, leurs poids sont déterminés en fonction du diamètre maximal des granulats.

Après exécution de cet essai, les matériaux sont criblés au tamis de 1,6mm de maille, le poids de la fraction passante est rapporté au poids de la prise d'essai. Le rapport multiplié par 100 est appelé coefficient Los-Angeles et noté LA.

$$LA = \frac{5000 - M}{5000} \times 100$$

Où M : Masse sèche du refus au tamis de 1,6mm.

#### IV.4. Dosage en gravillon :

Pratiquement on pourra considérer qu'on a affaire à un béton de sable, tant que le rapport massique gravillon sur sable (G/S) reste inférieur à 0,70 ( $G/S < 0,70$ ).

Ce béton de sable est appelé chargé. Cette notion sous-entend une forte discontinuité entre le diamètre maximum D1 du sable  $0/D1$  et le diamètre minimum d2 du gravillon  $d2/D2$ ,  $d2 \gg D1$ .

En outre, l'expérience montre que l'on peut considérer des matériaux à granulométrie continue O/D avec  $D \leq 8\text{mm}$ , comme des bétons de sable à partir du moment où le dosage pondéral d'éléments supérieurs à 4 mm (notées G) satisfait la règle précédente ( $G/S < 0,70$ ). Avec S représente le dosage pondéral en éléments inférieurs à 4mm.

#### IV.5. L'influence de l'ajout de gravillons :

Afin de bien qualifier les effets d'ajout de gravillon et vérifier les autres caractéristiques des bétons de sable, une étude a été faite en laboratoire sur trois types de gravillons de nature différente.

Les quantités de gravillons ajoutés ont volontairement été limitées à des taux faibles tel que le rapport massique du gravillon sur sable soit compris entre 0 et 1. Dans cet intervalle la charge en gravillon est suffisamment faible pour ne constituer qu'un ajout de composition, sans réellement avoir un effet structurel.

La formulation et le comportement de tels bétons de sable chargés restent ceux d'un béton de sable et non ceux d'un béton traditionnel pour lequel le rapport massique de gravillon sur sable (G/S) est supérieur à 1.5

Les figures (1, 2, 3, 4) montrent l'influence d'ajout de gravillon sur quatre caractéristiques du béton de sable, celles où cette influence a été la plus sensible.

##### ♦ La résistance au choc :

La figure (1) montre l'influence de l'ajout de gravillon sur la résistance au choc.

La particularité des bétons de sable est qu'ils résistent mieux aux chocs, cette particularité a été constatée empiriquement et attribuée à leur structure plus fine et plus homogène, permettant de mieux répartir les impacts, et d'éviter les éclatements que l'on observe sur les bétons classiques, facilités par le déchaussement des gros granulats sous l'effet du choc. Cette propriété a été étudiée à l'aide de l'essai Los-Angeles sur des cubes obtenus par sciage. L'influence de l'ajout de gravillons n'est favorable que jusqu'à un rapport du gravillon sur sable (G/S) de 0.25, au-delà de ce rapport, le gain est peu sensible et l'influence est même négative à partir du rapport (G/S) égale à 0.75, où la teneur en gravillons commence à avoir le même effet que sur un béton traditionnel.



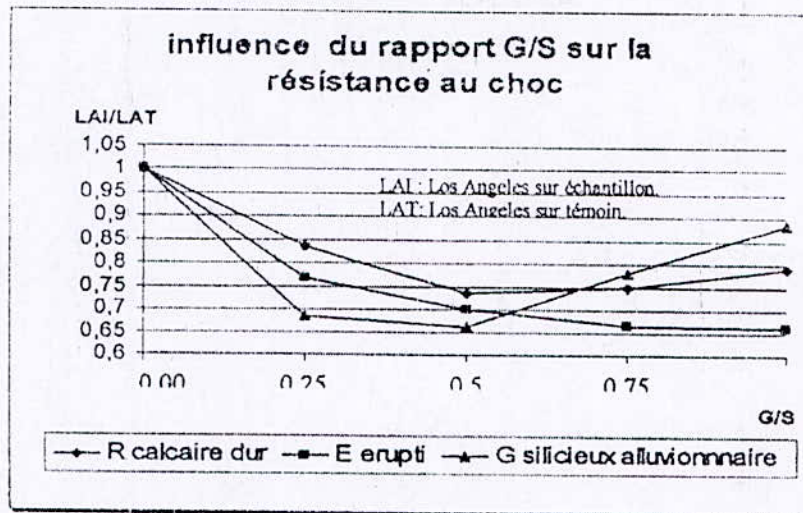


Figure 1 : Influence du dosage en gravillon sur la résistance au choc. [9]

♦ La résistance à l'attrition :

Quantifiée à l'aide de l'essai Deval, on peut constater que, comme il était prévisible, l'ajout de gravillons, quelle qu'en soit la nature, améliore sensiblement cette caractéristique d'environ de 50% a un rapport G/S égale à 0.5. Au-delà de ce dosage il n'y a presque plus d'amélioration. La figure (2) montre l'allure du développement de la résistance à l'attrition en fonction du dosage en gravillons.

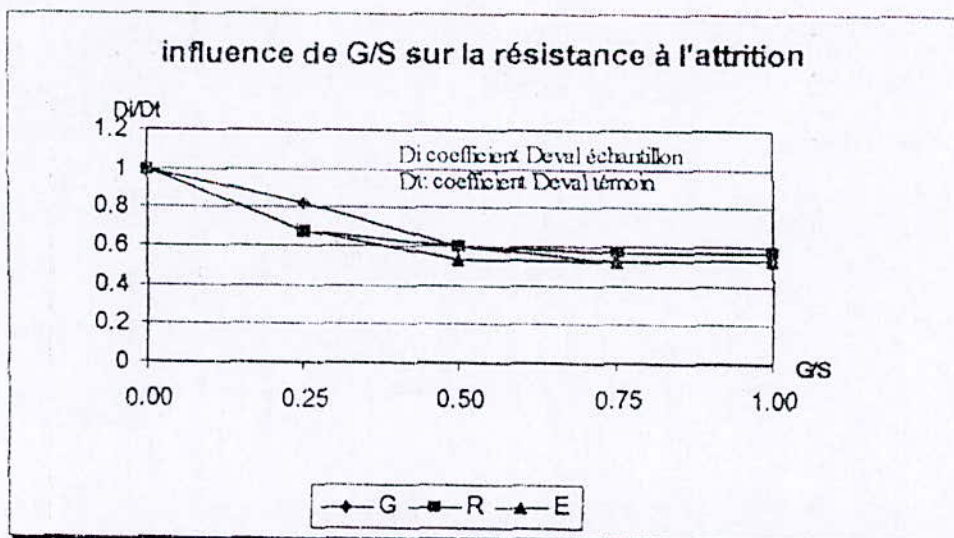


Figure 2 : Influence de G/S sur la résistance à l'attrition. [9]

♦ La résistance à la compression :

Un ajout de gravillons avec un rapport massique G/S égale à 0.25 se révèle très valorisant; 50% d'amélioration de cette caractéristique très importante et l'objectif recherché dans toute étude du béton en particulier celui destinée à la structure. Quelle que soit la nature du gravillon ajouté à partir de 0.25 l'influence est beaucoup moins significative.

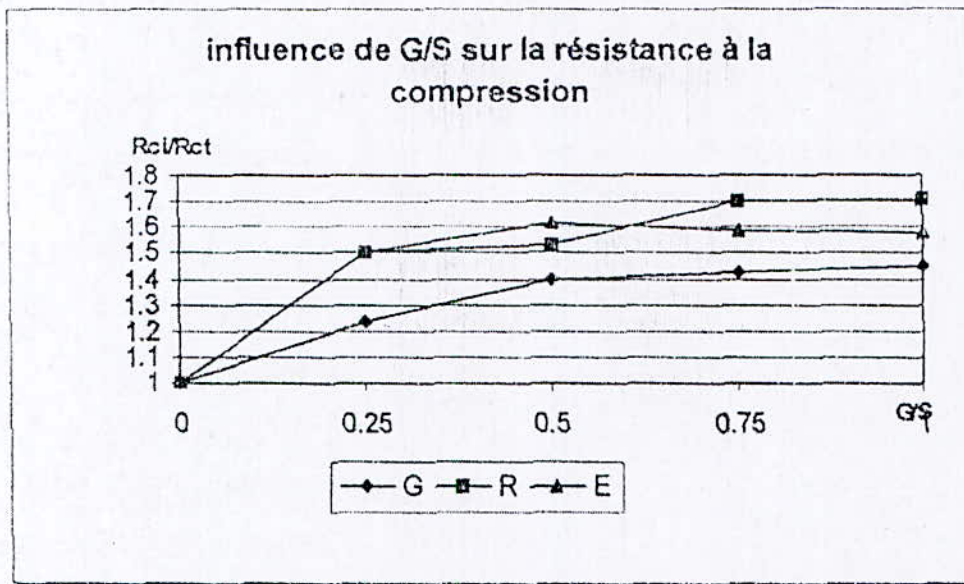


Figure 3 : Influence de G/S sur la résistance à la compression. [9]

♦ Module d'élasticité :

Les bétons de sable ont des modules d'élasticité plus faible que ceux des bétons classiques c'est une donnée générale des matériaux granulaires (0/D), pour les quels le module d'élasticité diminue lorsque le diamètre du gros granulat  $D_{max}$  diminue. Un béton de sable ayant une résistance à la compression de 24 à 30 MPa a généralement un module d'élasticité de l'ordre de 22000 MPa à 28 jours.

L'ajout de gravillons comme indique la figure c fait varier le module d'élasticité du béton de la même façon que la résistance à la compression. Le gain étant encore plus net quant le rapport du gravillon sur sable (G/S) passe de 0 à 0.25 et l'absence de l'influence est encore plus grande au delà de ces valeurs.



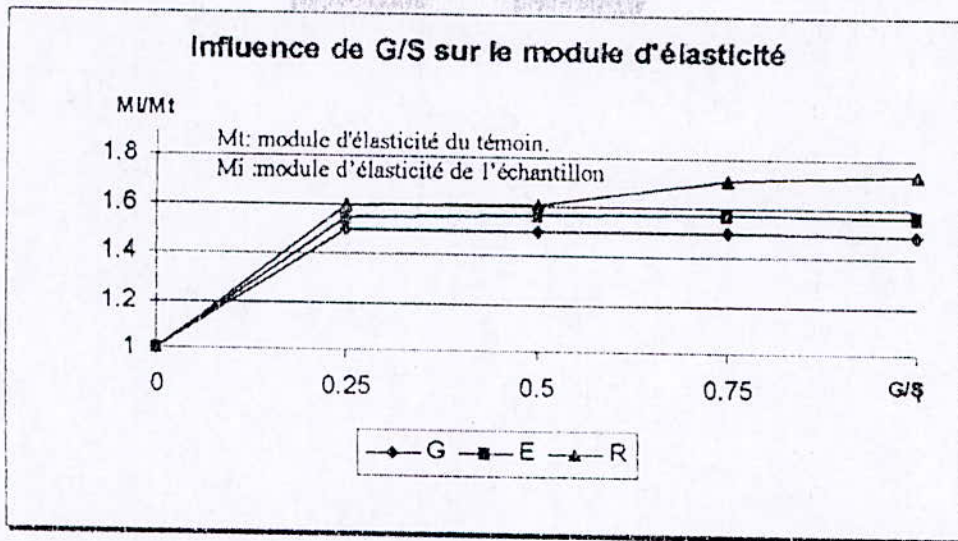


Figure IV.4 : Influence de G/S sur le module d'élasticité. [9]

Finalement, on peut dire que l'ajout d'une quantité de gravillon limitée telle que le rapport du gravillon sur sable soit inférieur à 0.5 ( $G/S < 0.5$ ) est suffisante pour améliorer les performances du béton.

Lorsque le rapport G/S est compris entre 0.25 et 0.5 toutes les propriétés des bétons de sable testées sont améliorées considérablement, notamment le module d'élasticité et la résistance à la compression; principales caractéristiques des bétons de structure. Aussi le fait que l'ajout de gravillons révèle inopérant au-delà d'un plafond faible tel que  $G/S < 0.5$  constitue un élément très intéressant qui pourrait être à la base d'une famille de bétons.

*CHAPITRE : V*

*LA POUDRETTE DE  
CAOUTCHOUC*



## Le Caoutchouc

### 1. Présentation :

Le caoutchouc, composé naturel ou synthétique, est caractérisé par son élasticité, son imperméabilité et sa résistance électrique. Le caoutchouc naturel est obtenu à partir d'un liquide blanc laiteux appelé latex, fourni par de nombreuses plantes ; les caoutchoucs synthétiques sont des élastomères préparés à partir d'hydrocarbures insaturés.

### 2. Caoutchouc naturel :

#### 2.1. Historique :

Certaines des propriétés et des utilisations du caoutchouc ont été découvertes dans l'Amérique du Sud précolombienne. Les Espagnols tentèrent pendant de nombreuses années, mais en vain, de reproduire les articles résistants à l'eau (chaussures, vestes et capes) des populations qu'ils colonisèrent. Le caoutchouc resta une simple curiosité de musée en Europe pendant les deux siècles qui suivirent.

Lors de son exploration géographique en Amérique du Sud, Charles de la Condamine expédia en France en 1736 plusieurs rouleaux de caoutchouc brut avec une description des produits fabriqués par les peuples de la vallée amazonienne. Cela fit naître un intérêt scientifique général pour ce produit et ses propriétés. En 1770, le chimiste britannique Joseph Priestley découvrit que le caoutchouc pouvait effacer ou gommer des marques d'encre par frottement. En 1791, la première application commerciale du caoutchouc fut lancée par un industriel britannique, Samuel Peal, qui breveta une méthode d'imperméabilisation des tissus par traitement avec une solution de caoutchouc dans la térébenthine. En 1823, Charles Macintosh fit construire une usine à Glasgow pour la fabrication de tissus et de vêtements auxquels il a donné son nom.

#### 2.1.1. Vulcanisation :

Les articles caoutchoutés acquirent une grande popularité au XIX<sup>e</sup> siècle, mais ils devenaient cassants par temps froid, et collants et nauséabonds par temps chaud.



En 1834, les chimistes allemand Friedrich Ludersdorf et américain Nathaniel Hayward découvrirent que l'addition de soufre à la gomme de caoutchouc diminuait ou même éliminait la nature collante des produits finis. En 1839, Charles Goodyear montra, en utilisant les résultats de ces deux chimistes, que la cuisson du caoutchouc en présence de soufre supprimait les propriétés indésirables de la gomme : ce fut la découverte de la vulcanisation.

Le caoutchouc vulcanisé a une solidité et une élasticité accrues, ainsi qu'une plus grande résistance aux changements de température ; il n'est pas perméable aux gaz et résiste à l'abrasion, aux réactions chimiques, à la chaleur et à l'électricité ; il présente également une résistance élevée au frottement sur des surfaces sèches, et faible sur des surfaces mouillées par l'eau.

### 2.1.2. Récupération des rebuts :

Peu après l'invention du pneu par Dunlop en 1887, l'industriel américain Chapman Mitchell fonda une nouvelle branche de l'industrie en recyclant le caoutchouc usagé pour de nouvelles utilisations, avec un procédé de traitement acide. Ce procédé utilisait l'acide sulfurique chaud pour éliminer les tissus incorporés au caoutchouc, et ce dernier était traité à chaud pour le rendre suffisamment plastique et l'incorporer dans des lots de caoutchouc brut.

En 1905, le procédé de récupération alcalin fut découvert par le chimiste américain Arthur Marks, qui mit également en place le premier laboratoire industriel pour le caoutchouc. Son procédé alcalin permettait de traiter de grandes quantités de caoutchouc récupéré, avec pratiquement la même qualité des produits finis. L'année suivante, le chimiste américain George Oenslager, travaillant dans le laboratoire de Marks, découvrit les accélérateurs organiques de vulcanisation, comme l'aniline (phénylamine) et la thiocarbanilide. Ces accélérateurs non seulement réduisent la durée de chauffage nécessaire pour la vulcanisation de 60 à 85 %, mais, de plus, améliorent la qualité du produit.

### 2.1.3. Durée de vie du caoutchouc :

Une dizaine d'années plus tard, la technologie du caoutchouc connut une nouvelle avancée avec l'apparition des fours à vieillissement accéléré permettant



d'étudier la détérioration du caoutchouc dans le temps. On put alors mesurer rapidement les pertes de propriétés dans différentes conditions, en particulier lors de l'exposition à l'oxygène atmosphérique. L'utilisation de ces fours permit de tester différents produits chimiques et d'ajouter des antioxydants qui augmentent la durée de vie des produits en caoutchouc, comme les pneus pour les véhicules et les articles souples, tels que gants, toiles et tuyaux.

D'autres progrès vinrent de l'utilisation du latex non coagulé. On introduisit des méthodes permettant d'extruder le caoutchouc en fils minces pour l'utilisation textile ; on put également déposer le caoutchouc sur des métaux et d'autres matériaux.

## 2.2. Obtention du caoutchouc brut :

### 2.2.1. État naturel :

À l'état naturel, le caoutchouc se présente sous la forme d'une suspension colloïdale de latex sécrétée par les plantes à caoutchouc. Les plus importantes de ces plantes sont l'*Hevea brasiliensis*, arbre de la famille des euphorbiacées et d'autres espèces du même genre.

Le caoutchouc brut provenant d'autres sources végétales est généralement contaminé par un mélange de résines (gutta-percha, balata), qui doivent être extraites avant que le caoutchouc ne soit utilisable. D'autres sources non tropicales de caoutchouc furent cultivées pendant la Seconde Guerre mondiale pour des raisons économiques : le guayule, *Parthenum argentatum* du Mexique, et le pissenlit russe, *Taraxacum kok-saghyz* du Turkestan.

### 2.2.2. Plantations à caoutchouc :

Les arbres à caoutchouc sauvages des jungles sud-américaines furent la principale source de caoutchouc brut pendant la majeure partie du XIX<sup>e</sup> siècle. En 1876, pour mettre fin au monopole brésilien, l'explorateur britannique Henry Wickham rapporta du Brésil environ 70 000 graines d'*Hevea brasiliensis*, qui servirent à établir les premières plantations, d'abord à Ceylan (aujourd'hui Sri Lanka), puis dans d'autres régions tropicales, principalement à l'intérieur d'une étroite bande s'étendant sur environ 1 000 km de part et d'autre de l'équateur. Environ 99 % du



caoutchouc des plantations proviennent de l'Asie du Sud-Est. Les tentatives pour établir d'importantes plantations à caoutchouc dans la zone tropicale occidentale ont échoué.

### 2.2.3. Récolte du latex :

La récolte du latex est effectuée par une entaille dans l'écorce des hévéas ; le latex qui exsude de l'entaille est recueilli dans un petit gobelet. Il est ensuite filtré, dilué à l'eau et traité avec un acide pour faire coaguler les particules de caoutchouc en suspension. Après avoir été pressuré entre des rouleaux pour en faire soit des plaques compactes, soit de minces feuilles crêpées, le caoutchouc est séché à l'air ou à la fumée avant de subir les transformations ultérieures.

### 2.3. Transformations industrielles :

Le caoutchouc brut, qui ne représente que la moitié du poids du produit fini, est traité mécaniquement et chimiquement jusqu'à l'obtention de produits spécifiques.

#### 2.3.1. Produits de mélange :

Pour la majorité des applications, le caoutchouc brut est mélangé avec différents composés pour modifier ses propriétés. Les charges qui améliorent l'élasticité du produit final, sans augmenter sa résistance, sont des produits à base de carbonate de calcium ou de sulfate de baryum. Les charges de renforcement qui améliorent la résistance du produit fini sont le noir de carbone, l'oxyde de zinc, le carbonate de magnésium ou différentes argiles. Pour la coloration, on utilise l'oxyde de zinc, le lithopone et un certain nombre de pigments organiques.

Des substances ramollissantes, nécessaires quand le mélange est trop dur pour que l'on puisse y incorporer correctement les additifs, sont généralement constituées de produits à base de pétrole, comme des huiles ou des graisses, des goudrons de pin ou des acides gras.

Enfin, pour diminuer les coûts, on peut ajouter des charges de caoutchouc de récupération.



### 2.3.2. Vulcanisation :

Après fabrication, la plupart des pièces en caoutchouc sont vulcanisées à haute température (150-300 °C) et sous pression élevée (10-20 bars). De nombreux articles sont vulcanisés dans des moules mis sous pression par des presses hydrauliques, mais les pressions élevées, nécessaires pour réaliser correctement la vulcanisation, peuvent aussi être obtenues en soumettant le caoutchouc à une pression de vapeur d'eau extérieure ou intérieure pendant le chauffage. Il existe également des procédés de vulcanisation en « bain de sels fondus » (meilleurs transferts thermiques) ou par ondes électromagnétiques (micro-ondes ou hyperfréquences).

L'agent principal de vulcanisation est le soufre, le sélénium et le tellure étant également utilisés. Dans le procédé de vulcanisation à chaud, qui est appliqué à la plupart des articles, le soufre est broyé et mélangé avec le caoutchouc en même temps que les autres additifs secs. La proportion de soufre est plus importante pour les articles rigides. La vulcanisation à froid, utilisée principalement pour les articles souples et minces, comme les gants et les feuilles, est effectuée en exposant les articles à la vapeur de chlorure de soufre ( $S_2Cl_2$ ). À l'origine, les accélérateurs de vulcanisation étaient uniquement des oxydes métalliques, comme la céruse et la chaux. Depuis les découvertes d'Oenslager, de nombreuses amines organiques peuvent également être utilisées à cette fin.

### 2.4. Propriétés physiques et chimiques :

Le caoutchouc brut (latex coagulé) est un polymère naturel blanc ou incolore, dont la plus petite unité est l'isoprène, de formule  $C_5H_8$ . À la température de l'air liquide (environ -195 °C), le caoutchouc brut est un solide dur et transparent ; de 0 °C à 10 °C, il est cassant et opaque ; au-dessus de 20 °C, il devient mou, élastique et translucide. Lorsque le caoutchouc est malaxé mécaniquement ou chauffé au-dessus de 50 °C, il devient plastique et collant. Il se décompose au-dessus de 200 °C.

Le caoutchouc brut est insoluble dans l'eau, les bases et les acides faibles ; il est soluble dans le benzène, le pétrole, les hydrocarbures chlorés et le sulfure de carbone. Il est facilement oxydé par les oxydants chimiques et lentement par l'oxygène de l'air.



## 2.5. Utilisations :

Le caoutchouc vulcanisé a de nombreuses applications. Sa résistance à l'abrasion en fait un produit souple adapté pour les bandes transporteuses et, en qualité moins souple, il est utilisé dans l'équipement des pompes et pour les tuyauteries servant à la manipulation des boues abrasives.

La flexibilité du caoutchouc est souvent mise à profit pour les tuyaux, les pneus et les rouleaux intervenant dans de nombreux appareils, des essoreuses domestiques aux presses d'imprimerie ; son élasticité est adaptée à la réalisation de différents systèmes d'absorption des chocs et de diminution des vibrations.

Suffisamment imperméable aux gaz, il est utilisé pour la fabrication de tuyaux transportant de l'air, des aérostats, des balles et des coussins.

La résistance du caoutchouc à l'eau et à la plupart des produits chimiques liquides en fait un produit adapté pour les vêtements de pluie, les équipements de plongée, les tuyauteries en chimie et en médecine, les revêtements de réservoirs et les équipements de transformation de liquides.

Du fait de leurs résistances électriques, les caoutchoucs souples sont utilisés pour l'isolation et la protection dans les gants, les chaussures et les couvertures. Les caoutchoucs plus durs sont employés pour l'équipement téléphonique, les appareils de radio, les compteurs et d'autres dispositifs électriques.

Le coefficient de frottement du caoutchouc étant élevé sur des surfaces sèches, et faible sur des surfaces mouillées, on emploie ce matériau dans les équipements de transport d'électricité et dans les pompes immergées dans les puits.

Par rapport au caoutchouc vulcanisé, le caoutchouc non vulcanisé a peu d'utilisations : pour les mortiers, les adhésifs, l'isolation, les bandes subissant des frottements et sous forme de crêpe, pour les couvertures isolantes et les chaussures.

Le caoutchouc mousse est obtenu directement à partir du latex en y ajoutant les ingrédients en émulsion. Le mélange est agité mécaniquement dans un appareil spécifique jusqu'à l'obtention de millions de bulles d'air. Cette mousse est versée dans des moules où elle est vulcanisée par chauffage pour donner des articles, tels que matelas ou coussins pour sièges.



Le latex peut être transformé en articles tels que des jouets ou des gants par trempage des moules correspondants, en porcelaine ou en plâtre de moulage, dans du latex liquide concentré. Le revêtement de latex recouvre le moule dont il est ensuite séparé après vulcanisation. Les articles obtenus directement à partir du latex représentent 8 % des applications du caoutchouc naturel.

### 3. Caoutchouc synthétique :

Tout composé produit artificiellement et semblable au caoutchouc naturel par ses propriétés chimiques et physiques essentielles peut être appelé caoutchouc synthétique. Ce sont des élastomères, c'est-à-dire des macromolécules produites par polymérisation et dont le comportement est visco-élastique (caoutchoutique) à la température d'utilisation. Après sa fabrication, le caoutchouc synthétique est également traité par vulcanisation.

L'importance politique et économique du caoutchouc devint évidente lorsque l'approvisionnement en provenance d'Extrême-Orient fut interrompu pendant la Seconde Guerre mondiale. En raison du manque aigu de caoutchouc naturel, plusieurs pays accélérèrent le développement du caoutchouc synthétique. Ses utilisations sont les mêmes que celles du caoutchouc naturel, dont les qualités restent cependant inégalées.

#### 3.1. Historique :

En 1860, le chimiste britannique Charles Hanson Greville Williams montra que le caoutchouc naturel était un polymère de l'isoprène, de formule chimique  $\text{CH}_2\text{C}(\text{CH}_3)\text{CHCH}_2$ . De nombreux efforts furent réalisés pendant les soixante-dix années qui suivirent pour synthétiser en laboratoire du caoutchouc à partir de cette molécule. D'autres monomères furent également expérimentés et, en 1909, le chimiste allemand F. Hofmann déposa le premier brevet pour un véritable caoutchouc synthétique.

Cependant, aucun progrès décisif dans la recherche sur le caoutchouc synthétique n'apparut jusque dans les années 1930, lorsque les chimistes américains Wallace Carothers et allemand Hermann Staudinger effectuèrent des travaux qui



contribuèrent grandement à la connaissance actuelle sur les macromolécules et les polymères.

### 3.2. Principaux caoutchoucs synthétiques :

Les caoutchoucs de synthèse sont principalement produits dans les pays les plus développés et dans l'ancien bloc soviétique. Vers les années 1980, on fabriquait dans les pays occidentaux sept grandes familles de caoutchoucs de synthèse.

#### 3.2.1. Caoutchoucs Buna :

En 1935, des chimistes allemands préparèrent par copolymérisation un premier groupe de caoutchoucs synthétiques, les caoutchoucs Buna. La copolymérisation est la polymérisation de plusieurs monomères différents, appelés comonomères. Le nom Buna correspond aux premières lettres de butadiène, l'un des comonomères, et de natrium, sodium en allemand, utilisé comme catalyseur.

Le SBR, copolymère du butadiène et du styrène, est très utilisé dans la fabrication des pneus : il a une grande résistance à l'abrasion. Il représente 60 % du caoutchouc synthétique produit dans le monde et 37,3 % de la production totale de caoutchouc. Le polybutadiène BR est utilisé comme produit de coupage pour les caoutchoucs naturels (10,7 % de la production totale).

#### 3.2.2. EPM et EPDM :

Les copolymères d'éthylène et de propylène (EPM) ont été mis au point par le chimiste italien Giulio Natta dans les années 1950. Ils présentent d'excellentes propriétés élastiques et un faible prix de revient, mais sont difficilement vulcanisables. Aussi n'occupent-ils pas une place prépondérante sur le marché. L'apparition des terpolymères EPDM – polymères obtenus par polymérisation de l'éthylène, du propylène avec un diène –, facilement vulcanisables, n'a pas encore transformé les habitudes de consommation.

Ils représentent 4,3 % de la production mondiale de caoutchouc.

#### 3.2.3. Caoutchouc butyle :

Le caoutchouc butyle, préparé pour la première fois en 1940, est obtenu par la copolymérisation de l'isobutène avec le butadiène ou l'isoprène. Il est plastique et



peut être mis en forme et mélangé comme le caoutchouc naturel, mais il est difficile de le vulcaniser.

Bien qu'il présente une moins grande résistance aux chocs que le caoutchouc naturel ou que d'autres caoutchoucs synthétiques, il est extrêmement résistant à l'oxydation et à l'action des produits chimiques corrosifs. Du fait de sa faible perméabilité aux gaz, il est largement employé dans les chambres à air des pneus de voitures.

Il représente 4,2 % de la production mondiale de caoutchouc.

#### 3.2.4. Polyisoprène de synthèse :

La recherche menée aux États-Unis sur le caoutchouc synthétique à partir de la Seconde Guerre mondiale a débouché sur la synthèse d'un polymère de l'isoprène de composition chimique identique au caoutchouc naturel.

Le polyisoprène de synthèse représente 3,1 % de la production mondiale de caoutchouc.

#### 3.2.5. Néoprène :

Les recherches du chimiste américain Carothers conduisirent à la synthèse du Néoprène en 1931. Il s'agit d'un polymère dont le monomère est le chloroprène, de formule chimique  $\text{CH}_2\text{C}(\text{Cl})\text{CHCH}_2$ . Le Néoprène présente une grande résistance à la chaleur (supérieure à 150 °C) et aux produits chimiques, comme les huiles et le pétrole. Il est utilisé dans les conduites de transport de pétrole, comme matériau isolant dans les câbles et les équipements de machines, et dans les colles.

Il représente 3,1 % de la production mondiale de caoutchouc.

#### 3.2.6. Caoutchouc nitrile :

Les copolymères de butadiène-acrylonitrile (NBR), ou caoutchouc nitrile, sont remarquablement résistants aux solvants, aux huiles et aux graisses.

Ils représentent 2,1 % de la production mondiale de caoutchouc.

#### 3.2.7. Autres caoutchoucs de spécialités :

De nombreux autres caoutchoucs synthétiques aux propriétés spécifiques ont été mis au point. Par exemple, le Koroseal est un polymère du chlorure de vinyle



( $\text{CH}_2\text{CHCl}$ ). Il résiste à la chaleur, à l'électricité, à la corrosion et n'est pas détérioré par l'exposition à la lumière ou par un long stockage. Le Koroseal ne peut pas être vulcanisé, mais il est plus résistant à l'abrasion que le caoutchouc naturel ou le cuir lorsqu'il reste à des températures modérées.

Le Thiokol est obtenu par la copolymérisation du 1,2-dichloroéthylène ( $\text{CHClCHCl}$ ) et du tétrasulfure de sodium ( $\text{Na}_2\text{S}_4$ ). Ce composé, qui peut être mis en forme et vulcanisé comme le caoutchouc naturel, résiste aux huiles et aux solvants organiques des vernis et est également utilisé pour l'isolation électrique, car les décharges électriques ou la lumière ne l'endommagent pas.

De nombreux autres caoutchoucs synthétiques sont produits par des méthodes voisines de celles que l'on a décrites précédemment. Certaines modifications des procédés, y compris de la polymérisation, ont amélioré la qualité et abaissé les coûts de production. Un progrès marquant a consisté à utiliser de l'huile de pétrole comme additif bon marché : les pneus fabriqués avec ce caoutchouc ont une très longue durée de vie. D'autres progrès importants ont été effectués pour la mousse de caoutchouc synthétique, utilisée principalement pour le capitonnage, les matelas, les oreillers et également pour le caoutchouc crêpe cellulaire utilisé dans l'industrie de la chaussure.

L'ensemble des caoutchoucs de spécialités représente 1,6 % de la production mondiale de caoutchouc.

#### 4. Production mondiale :

En 1994, la production mondiale de caoutchouc était d'environ 15 millions de tonnes, dont 10 millions de tonnes de caoutchouc synthétique. Ce dernier est surtout issu des pays développés : les États-Unis en produisent 25 %, le Japon, de 10 à 12 %, la France et l'Allemagne fédérale en produisent chacune environ 500 000 t, puis vient la Grande-Bretagne. Actuellement, 90 % du caoutchouc naturel consommé mondialement est produit par la Malaisie, l'Indonésie et la Thaïlande. Les pneus représentent à eux seuls 55 % des élastomères consommés dans le monde.



## La poudrette de caoutchouc

### 1. Introduction : [8]

Les poudrettes varient de granules 25.4mm aux poudrettes fines 0.2mm.

C'est une nouvelle matière pour de nombreuses applications :

- Sous-sol de terrain de sport,
- Piste d'athlétisme,
- roulement de pneus.

Les déchets de caoutchouc représentent un gisement valorisable important tant en volume qu'en poids. Le gisement provient de 4 origines dont la principale est celle des ménages (environ 70% du gisement) :

- pneumatiques usagés

Les autres sources sont industrielles :

- déchets de caoutchouc industriel (fabrication de chaussures, tuyaux, revêtements de sols, ...),
- déchets de fabrication de pneus,
- déchets de rechapage des pneus.

Actuellement, 25% du gisement du caoutchouc et des pneumatiques sont valorisés bien qu'il existe de nombreux modes de traitement.

### 2. La fabrication de poudrette de caoutchouc : [8]

Les pneus sont broyés mécaniquement. Les granulés qui en résultent sont utilisés dans la fabrication de revêtements de sols industriels et sportifs, d'écrans anti-bruit, ...

Le procédé de vulcanisation du caoutchouc normal la rend plus durable et résistante. Le problème en ce matériel est lié à sa dégradation difficile. En remblais, le caoutchouc, sous la forme de pneu, tend à tenir la mare, apportant des risques à la santé, parce qu'il crée l'environnement approprié à la croissance des insectes et dans le foret de granule il est nocif à l'environnement.

L'installation de pulvérisation doit être équipée de manière à pouvoir délivrer des produits présentant la qualité requise. La séparation magnétique des métaux et la séparation sous jet d'air des composants textiles figurent parmi les processus appliqués. Les granulats ou la poudre ainsi que les déchets d'acier devront être valorisés, tandis que les textiles seront incinérés dans une UIOM ou dans une autre installation appropriée. Les dégagements de poussières seront limités par l'installation de filtres appropriés. Il y a lieu de respecter les dispositions de l'ordonnance sur la protection de l'air (OPair) et de l'ordonnance sur la protection contre le bruit (OPB). Il faut également tenir compte des conditions posées par l'autorité compétente pour la prévention des incendies et des explosions.

### 3. utilisation dans le béton :

L'utilisation de ce matériau dans le béton est une alternative suggérée pour beaucoup d'auteurs. L'utilisation du caoutchouc de pneu est conseillée quand la mécanique de résistance n'est pas la caractéristique principale mais la résistance à l'impact, au bas poids spécifique et à la dureté plus élevée.



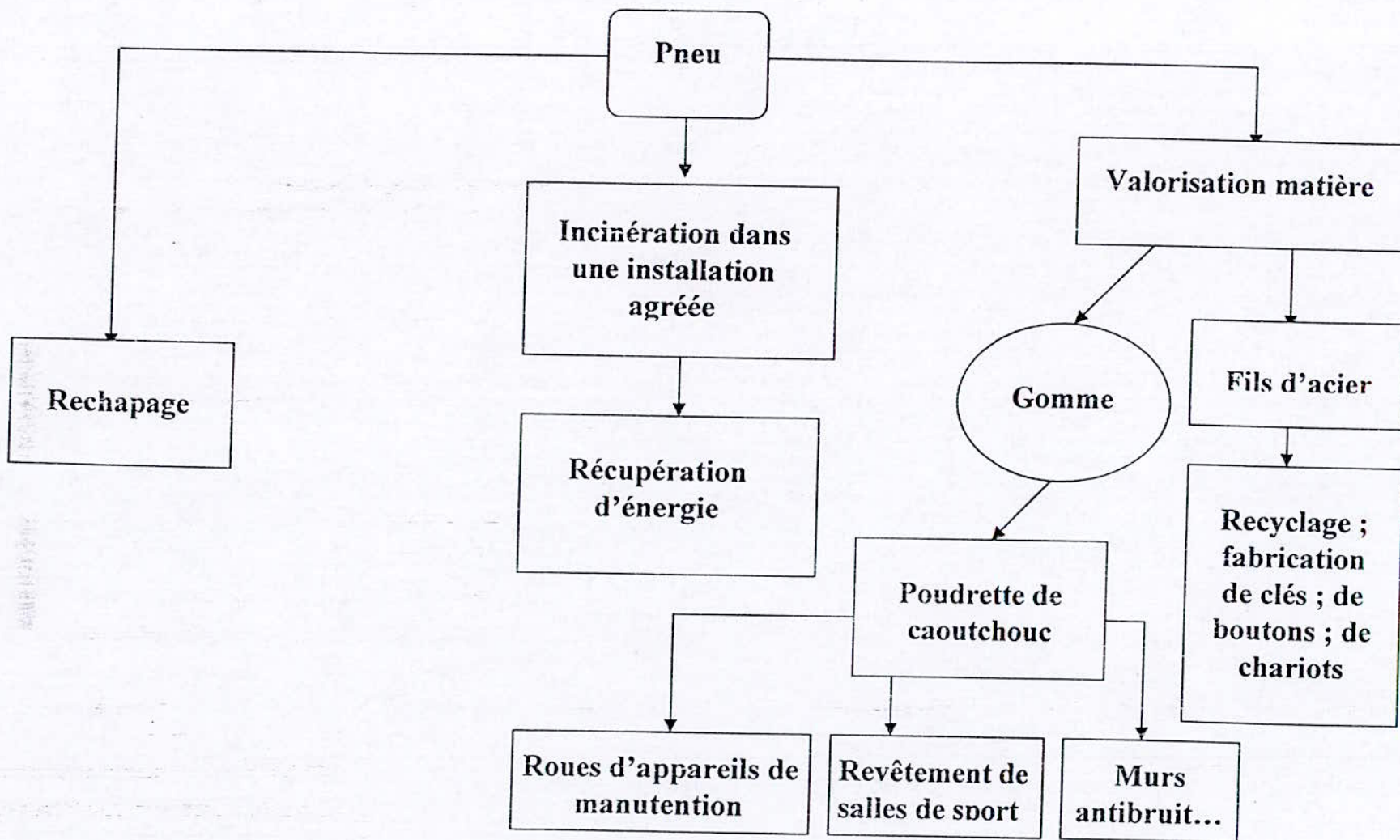


Figure 1 : recyclage de caoutchouc [8]

*PARTIE  
EXPERIMENTALE*



*CHAPITRE : VI*

*IDENTIFICATION  
DES MATÉRIAUX*

## Chapitre VI : Identification des matériaux utilisés

### VI.1. Introduction :

L'identification des matériaux entrant dans la composition des bétons est indispensable. La connaissance des caractéristiques physico-chimiques de chaque composant à part, par des analyses et essais normalisés effectués au laboratoire, nous permet de faire l'interprétation des résultats obtenus par les essais sur le mélange de ses matériaux.

Au cours de ce travail, les essais et analyses effectués sur le sable de dune, sable de concassage, gravillon, et la poudrette de caoutchouc sont :

#### VI.1.1. Analyse granulométrique :

C'est la mesure de la distribution dimensionnelle des grains d'un granulat.

La variation de la masse du passant en fonction de la dimension de la maille carrée du tamis est représentée par une courbe granulométrique.

#### VI.1.2. Module de finesse :

C'est un nombre caractérisant la forme des grains de sable, il est égal au centième de la somme des refus exprimés en pourcentage pondéral des tamis (0.16), (0.315), (0.63), (1.25), (2.5), et 5 mm.

Plus le sable est fin, plus son module de finesse est petit. Il est à noter que les sables entrant dans la composition des bétons hydrauliques doivent avoir un module de finesse compris entre 2.20 et 2.80.

#### VI.1.3. Equivalent de sable :

Résultat de l'essai du même nom caractérise la propreté d'un sable d'origine naturelle ou artificielle.

La valeur de cet essai (noté ES) est le rapport, multiplié par 100, de la hauteur de la partie sableuse sédimentée à la hauteur totale de flocculat et de la partie sableuse sédimentée.

Les sables doivent satisfaire aux exigences de la norme NF P18-541 donnés par le tableau ci-dessous :



Sable roulé	Sable concassé
Es $\geq$ 75 %	Es $\geq$ 65 %

#### VI.1.4. Essai au bleu de méthylène :

Cet essai a le même but que l'essai précédent, mais son avantage est d'être à la fois quantitatif et qualitatif.

-Quantitatif : A nature de fines donnée, plus la teneur en fines sera importante plus la valeur du bleu sera forte.

-Qualitatif : A teneur en fines donnée, plus les fines seront 'actives' plus la valeur de bleu sera également importante.

Les valeurs au bleu de méthylène sont données par le tableau ci-dessous :

Sable roulé	Sable concassé
VBm $\leq$ 1	VBm $\leq$ 1

#### VI.1.5. Friabilité des sables :

Cet essai est aux sables ce qu'est l'essai micro-Deval pour les gravillons. Il consiste à déterminer la résistance des sables à l'attrition.

Une valeur élevée du coefficient de friabilité des sables (FS > 60%) indique de fortes proportions d'éléments tendres ou friables nuisibles à l'aspect des parements et à la durabilité des bétons.

#### VI.1.6. Masses volumiques apparente et absolue :

La masse volumique apparente est la masse du matériau par unité de volume, celui-ci intégrant à la fois les grains et les vides. Il ne faut pas la confondre avec la masse volumique absolue qui est la masse par unité de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre les grains. Elles sont exprimées en Kg/m<sup>3</sup> et déterminées selon les méthodes classiques, respectivement masse d'un certain volume de matériau et éprouvette graduée (ou bien le pycnomètre).

**VI.1.7. Compacité et porosité :**

La compacité est définie comme le rapport du volume des grains solides par unité de volume de granulat.

$$C = V(\text{grains solides}) / V(\text{apparent})$$

La porosité est définie comme le rapport du volume des pores remplis d'eau ou d'air par unité de volume du granulat. C'est le complément à l'unité de la compacité.

$$P = 1 - C = V(\text{vide}) / V(\text{apparent})$$

**VI.1.8. Coefficient d'aplatissement des gravillons :**

C'est le pourcentage des grains tel que, si G désigne la dimension de la maille carrée minimale à travers laquelle passe l'élément et E le plus petit écartement d'un couple de plans tangents parallèles, on ait :  $G/E > 1,58$ .

**VI.1.9. Analyse chimique:**

Cette analyse concerne la détermination des éléments chimiques majoritaires, qui donnent aux matériaux leurs caractéristiques chimiques, ainsi que les proportions de matières nuisibles telles que les sulfates et sulfures, les chlorures et les matières organiques qui, présente au-delà d'un certain seuil, peuvent provoquer la perturbation des performances du béton étudié.



## VI.2- Sable de dune :

Au cours de cette expérimentation, on a utilisé un sable dunaire dont le prélèvement s'est fait à Boussaâda, ces caractéristiques physico-chimiques sont présentées ci-dessous :

## VI.2.1. Caractéristiques physiques :

## a) Analyse granulométrique :

Tableau 1 : analyse granulométrique du sable de dune

Tamis (mm)	Tamisât (%)
5	100
2.5	99.56
1.25	99.29
0.63	98.74
0.315	88.87
0.160	25.54
0.08	1.58

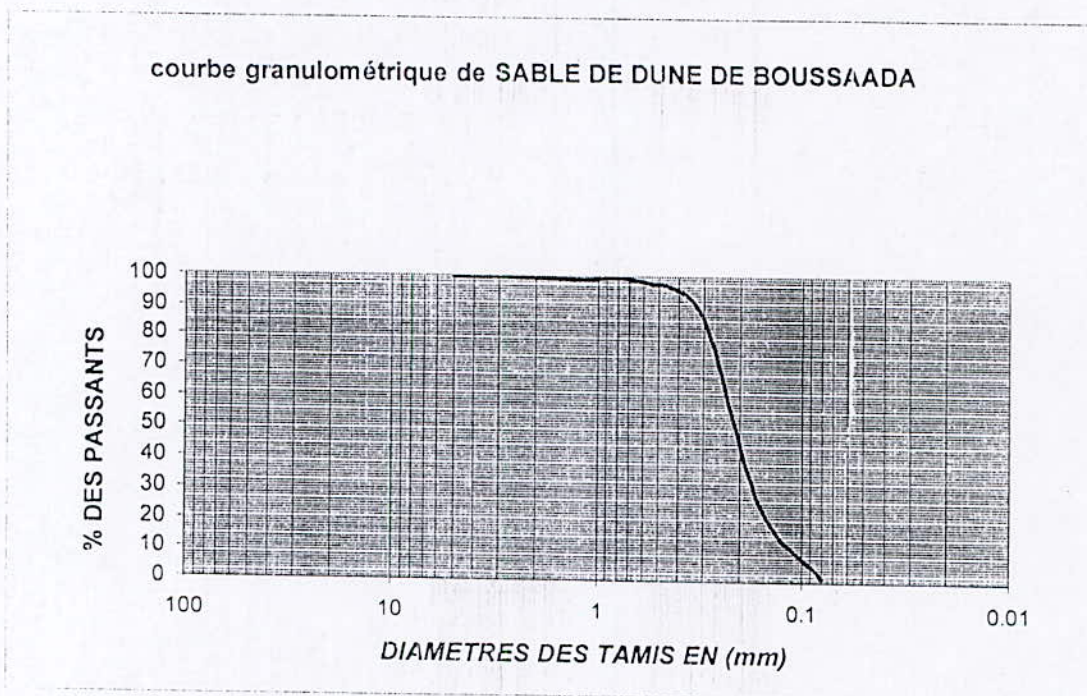


Figure 1 : Courbe granulométrique du sable de dune

## b) Propriétés physiques :

Tableau 2 : propriétés physiques du sable de dune

Module de finesse ( $M_f$ )	0.88
Equivalent de sable (ES)	88 %
Valeur au bleu de méthylène (VB)	0.17
Friabilité	13.43 %
Masse volumique apparente	1498 kg/m <sup>3</sup>
Masse volumique absolue	2500 kg/m <sup>3</sup>
Compacité	59.9 %
Porosité	40.1 %

## VI.2.2. Analyse chimique :

Tableau 3 : analyse chimique sommaire du sable de dune

Matières ou éléments	Proportion (%)
Insolubles (silice SiO <sub>2</sub> +silicates)	94.60
Oxyde de fer (FeO <sub>3</sub> ) et oxyde d'alumine (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.78
Chlorures (Na Cl)	0.23
Sulfates (CaSO <sub>4</sub> , 2 H <sub>2</sub> O)	traces
Carbonates (CaCO <sub>3</sub> )	5.13
Anhydride Carbonique (CO <sub>2</sub> )	2.34
Perte au feu à 1050 °C	2.38
Eau de constitution (H <sub>2</sub> O)	0.50

## Interprétation :

Ce sable est de nature siliceuse vu le taux important d'insolubles (silice SiO<sub>2</sub>+silicates)



### VI.3.Sable de concassage :

Ce matériau provient de la carrière de KEDDARA, ses caractéristiques physico-chimiques sont présentées ci-dessous :

#### VI.3.1.Caractéristiques physiques :

##### a)Analyse granulométrique :

Tableau 4 : analyse granulométrique du sable de concassage

Tamis (mm)	Tamisât (%)
8	100
6.3	99.9
5	99.7
2.5	95.5
1.25	63.11
0.63	39.11
0.315	19.71
0.16	7.61
0.08	1.01

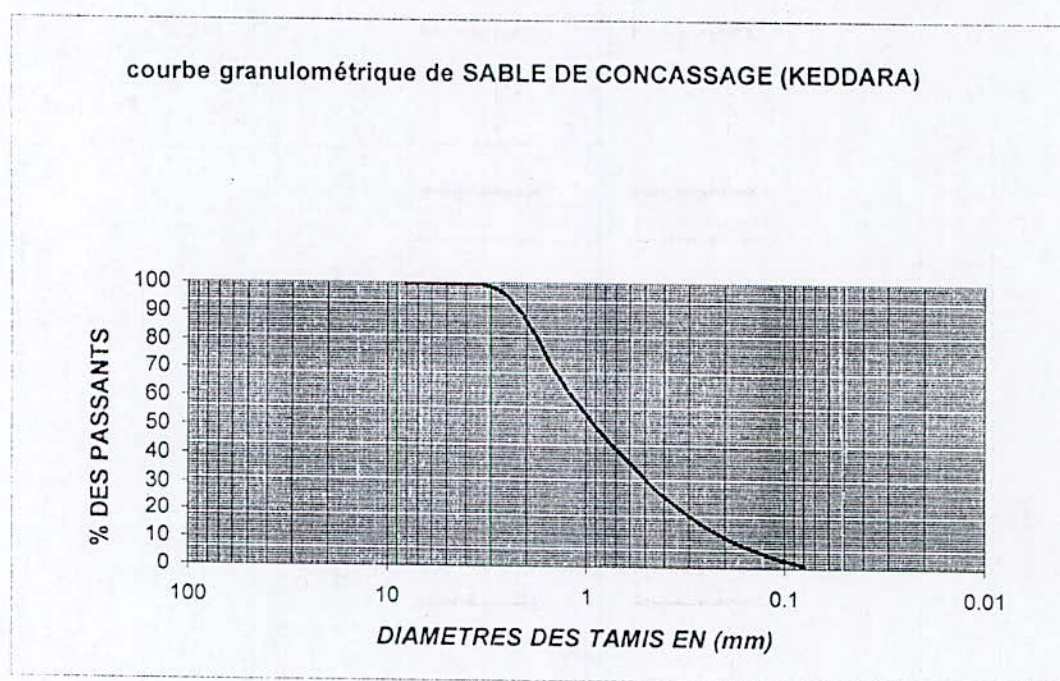


Figure 2 : Courbe granulométrique du sable de concassage

## b) Propriétés physiques :

Tableau 5 : propriétés physiques du sable de concassage

Module de finesse ( $M_f$ )	2.75
Equivalent de sable (ES)	91.09 %
Valeur au bleu de méthylène (VB)	0.06
Friabilité	58 %
Masse volumique apparente	1525 kg/m <sup>3</sup>
Masse volumique absolue	2631.5 kg/m <sup>3</sup>
Compacité	57.95 %
Porosité	42.05 %

## VI.3.2. Analyse Chimique :

Tableau 6 : analyse chimique sommaire du sable de concassage

Matières ou éléments	Proportion (%)
Insolubles (silice SiO <sub>2</sub> +silicates)	1.5213
Oxyde de fer (FeO <sub>3</sub> ) et oxyde d'alumine (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	1.3252
Chlorures (NaCl)	0.1460
Sulfates (CaSO <sub>4</sub> ,2H <sub>2</sub> O)	Traces
Carbonates (CaCO <sub>3</sub> )	93.006
CO <sub>2</sub>	40.606

Interprétation :

Ce sable est de nature carbonatée



**VI.4-Gravillon :**

Les gravillons utilisés sont des gravillons 3/8 provenant de la carrière de KEDDARA (BOUMERDES), leurs caractéristiques physico-chimiques sont présentées ci-dessous :

**VI.4.1.Caractéristiques physiques :****a)Analyse granulométrie :****Tableau 7 : analyse granulométrique du gravillon**

Tamis (mm)	Tamisât (%)
16	100
12	100
10	100
8	98.35
6.3	74.85
5	39.31
2.5	4.31
1.25	0.38
0.63	0.07
0.315	0.05
0.16	0.03
0.08	0.02

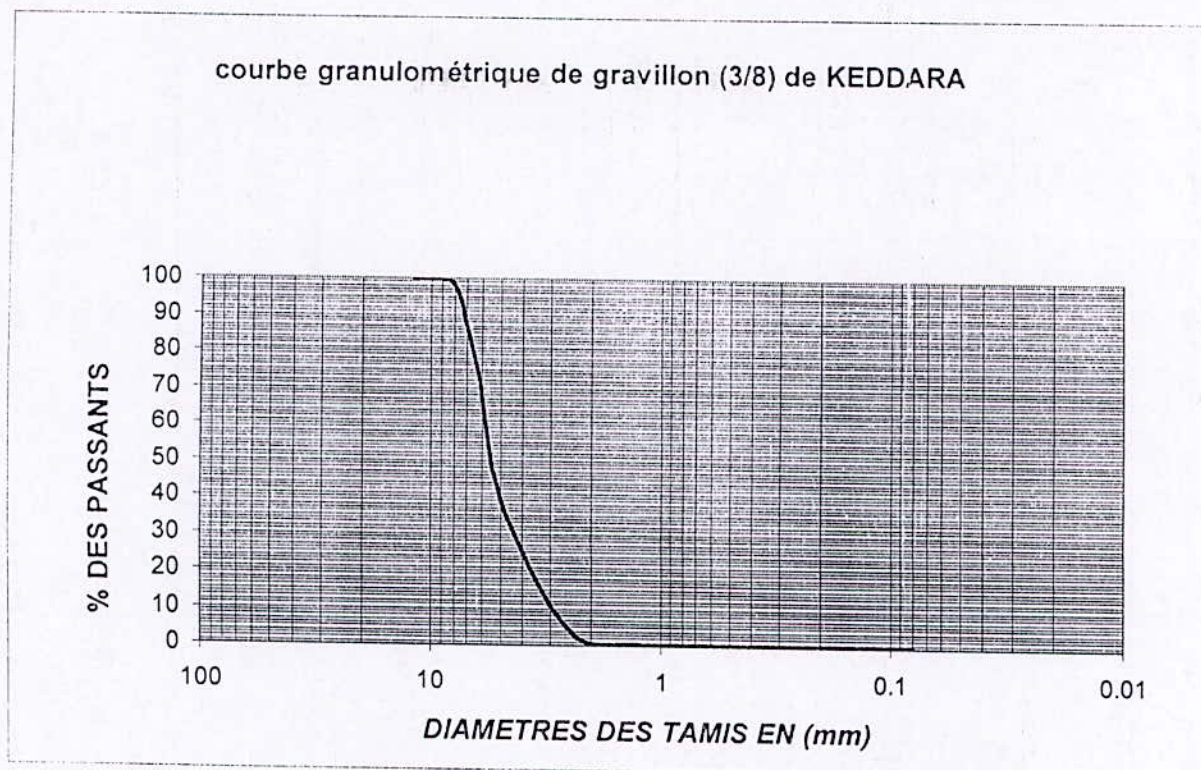


Figure 3 : Courbe granulométrique du gravillon

## b) Propriétés physiques :

Tableau 8 : propriétés physiques du gravillon

Coefficient d'aplatissement	33.24 %
Micro-Deval	32.4 %
Los-Angeles	30.74 %
Masse volumique apparente	1254.5 kg/m <sup>3</sup>
Masse volumique absolue	2597 kg/m <sup>3</sup>
Compacité	48.3 %
Porosité	51.7 %



## VI.4.2. Analyse chimique :

Tableau 9 : analyse chimique sommaire du gravillon

Matières ou éléments	Proportion (%)
Insolubles (silice SiO <sub>2</sub> +silicates)	1.0825
Oxyde de fer (FeO <sub>3</sub> ) et oxyde d'alumine (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	1.5212
Chlorures (NaCl)	0.1460
Sulfates (CaSO <sub>4</sub> ,2H <sub>2</sub> O)	Traces
Carbonates (CaCO <sub>3</sub> )	91.575
CO <sub>2</sub>	39.981

## Interprétation :

Ce gravillon est de nature carbonatée.

## VI.5. Conclusion :

En se référant aux prescriptions normatives sur les sables pour bétons, le sable de dune de Boussaâda est classé hors normes : granulométrie fine, faible module de finesse ainsi une grande porosité (faible compacité). Par contre, certaines qualités de ce sable telles qu'une granulométrie continue, un bon équivalent de sable et une composition chimique siliceuse avec absence de matières nuisibles permettent son utilisation en béton de sable, on peut minimiser sa porosité par l'ajout d'un filler.

L'utilisation simultanée d'un sable dunaire et d'un sable de concassage conduit à une correction mutuelle de leurs inconvénients.

**VI.6. La poudrette de caoutchouc :**

La poudrette de caoutchouc qu'on a utilisé provient de broyage de chutes de caoutchouc, elle est utilisée dans notre cas comme ajout dans le béton de sable, elle est de taille de 1.25 mm maximum et 31% < 0.08 mm de densité égale à 0.5. La pureté de ce déchet est de l'ordre de 45 %. Elle est fournie par (SAEL) de Oued Smar.

**VI.7- L'eau de gâchage :**

C'est une eau courante du robinet qui a été utilisée pour la confection du béton de sable. Cette eau est dépourvue des excès de matières nuisibles telles que les sels, les sulfates et les acides.

**VI.8- L'adjuvant :**

Nous avons utilisé le GLENIUM ; c'est un superplastifiant haut réducteur d'eau pour béton à faible (E/C) et haute performance compatible avec tous les ciments. Une fiche technique, identifiant cet adjuvant, est présentée dans (Annexe A).

**VI.9. Le ciment :**

Nous avons utilisé un seul type de ciment au cours de cette expérimentation. Il s'agit d'un ciment portland composé CPJ-CEM II A 32.5 (similaire au CPJ 45).

Ce ciment provient de la SOCIETE DES CIMENTS DE LA MITIDJA (MEFTAHLBLIDA), dont les caractéristiques sont :



## VI.9.1. Analyse chimique :

Tableau 11 : analyse chimique du ciment

Eléments	Teneur (%)	Exigences (NA 2185) éq à la norme NF P15 301
SiO <sub>2</sub>	21.01	*
CaO	63.89	*
MgO	1.10	< 5.0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.07	*
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.40	*
SO <sub>3</sub>	2.42	< 4.0
P.F	1.46	*
CaO libre	0.23	*
R.lns	1.15	*
Cl <sup>-</sup>	0.013	< 0.05
Na <sub>2</sub> O	0.25	*
K <sub>2</sub> O	0.765	*

\* Non normalisé.

## VI.9.2. Essais physico-mécaniques :

Tableau 12 : analyse physico-mécanique du ciment

Eléments		Résultats	Exigences (N.A 442/2000) éq à la norme NF P15 301
Densité	g/l	913	*
S.S.B.	cm <sup>2</sup> /g	3043	*
C.N	%	28.06	*
Prise h, mn	Début	1h49	> 1h30
	Fin	3h37	< 10h00
EXP	mm	0.69	< 10mm
Résistance à la flexion (Mpa)	02 jours	5.10	*
	07 jours	7.33	*
	28 jours	8.25	*
Résistance à la compression (Mpa)	02 jours	22.42	> 10
	07 jours	43.62	*
	28 jours	58.10	CPJ-CEM II/A 32.5

\* Non normalisé.



# *CHAPITRE : VII*

*CARACTÉRISTIQUES DE  
BÉTON DE SABLE MODIFIÉ  
AVEC LA POUDRETTE DE  
CAOUTCHOUC*

### VII.1. Introduction :

La maniabilité, la durabilité et la résistance à la compression sont les propriétés systématiquement visées par une étude de formulation du béton. Mais il arrive aussi que l'on se préoccupe d'autres propriétés du béton durci comme le retrait, la résistance à la traction, le fluage, le module d'élasticité....etc.

Le comportement mécanique du béton sous des actions quasi-instantanées n'a fait l'objet, jusqu'à présent, que d'études très partielles. *Les* réponses à des sollicitations de compression et de flexion ont donné lieu à beaucoup d'essais, les réponses à des sollicitations de traction, de cisaillement et de torsion ont été moins étudiées.

Par «quasi-instantané » nous entendons une durée de chargement suffisamment longue pour qu'on puisse considérer que le phénomène est de type statique et suffisamment court pour qu'on puisse négliger les effets d'hydratation, de fluage ou de relaxation. Il existe deux causes principales de déformations résiduelles après déchargement, la consolidation sous la dépendance de la compression qui diminue la porosité et la microfissuration suite à des contraintes de traction locales qui l'augmente.

Durant cette partie on a effectué deux types d'essais :

#### ♦ Compression simple :

C'est le plus connu des essais mécaniques et qui est dans l'état actuel des connaissances et de la technologie en la matière, le plus significatif pour caractériser la qualité générale du béton.

L'essai de compression s'effectue au moyen d'une presse sur des éprouvettes normalisées. Le corps d'épreuve est placé entre les plateaux de la presse. Ces derniers vont gêner la déformation transversale en créant des contraintes tangentes par frottement entre eux et les surfaces du corps d'épreuve en contact.

Ces contraintes tangentes vont à leur tour s'opposer au gonflement (déformation transversale) de l'éprouvette ce qui correspond à un fretage localisé qui entraîne une augmentation de résistance.

Si l'effort est correctement centré et uniformément réparti, les premières fissures apparaissent dans la région centrale et elles sont parallèles au sens de l'effort. S'il apparaît une fissuration longitudinale il y aura une rupture par glissement ou par éclatement. Ces phénomènes se



retrouvent surtout dans les bétons à hautes résistances.  $R_{cj} = F_{\text{éguille}} / S$

♦ **Traction par fendage (essai brésilien), (NF P18-408) :**

Le principe de l'essai est simple ; l'éprouvette cylindrique est couchée entre les deux plateaux d'une presse de compression afin de solliciter en compression deux génératrices opposées.

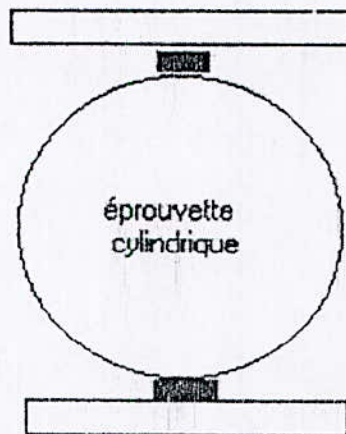


Figure1 : Essai de traction par fendage.

$$F_t (\text{fendage}) = 20 \times F / (\pi \times a \times h)$$

h : longueur de l'éprouvette cylindrique (cm).

a : diamètre de l'éprouvette (cm).      F: effort de rupture en KN.

♦ **Principales dispositions du mode opératoire :**

Les résultats de ce type d'essai dépendent notablement des conditions opératoires. Pour obtenir les résultats les plus significatifs, il conviendra de maîtriser au maximum les points suivants :

- ❖ Choix des dimensions des éprouvettes.
- ❖ Conservation des éprouvettes (cure au jeune âge et jusqu'au jour d'essai de compression).
- ❖ Confection des éprouvettes.
- ❖ Rectification des éprouvettes (soufre, graisse spéciale, ...).
- ❖ Choix et réglage de la presse.
- ❖ Centrage de l'éprouvette.
- ❖ Vitesse et montée en charge.

**Remarque :** Ces essais ont été effectués au niveau de laboratoire de la société nationale des gros ouvrages d'art (ENGOA).

## VII.2.Première série d'essais : étude des compositions témoins

Une étude a été faite sur un béton de sable de dunes avec ajouts de gravillon (3/8) et de sable concassé (0/3). La moitié de la quantité de sable dunaire obtenue lors de la formulation de base, est remplacée par ces deux matériaux à des proportions complémentaires à 50% et variant par pas de 10%. Parmi ces compositions, celle qui a paru la plus intéressante, est celle qu'elle donne une résistance relative en traction et en compression les plus importantes. Notre étude est basée sur ces deux formules optimales données ci-après :

### VII.2.1.Composition avec ajout de sable concassé (BSD0) :

BSD0 : béton de sable de dunes non chargé.

Ciment.....	375 (Kg/m <sup>3</sup> )
Adjuvant.....	1.5 (Kg/m <sup>3</sup> )
Sable de dunes.....	666.49 (Kg/m <sup>3</sup> )
Sable concassé.....	705.55 (Kg/m <sup>3</sup> )
Eau.....	217.89 (Kg/m <sup>3</sup> )
E/C =0.58	

### VII.2.2.Composition avec ajout de sable concassé et gravillon (3/8) (BSDC0) :

BSDC0 : béton de sable de dunes chargé.

Ciment.....	375 (Kg/m <sup>3</sup> )
Adjuvant.....	1.5 (Kg/m <sup>3</sup> )
Sable de dunes.....	666.49 (Kg/m <sup>3</sup> )
Sable concassé.....	282.22 (Kg/m <sup>3</sup> )
Gravillon.....	412.39 (Kg/m <sup>3</sup> )
Eau.....	215.63 (Kg/m <sup>3</sup> )
E/C =0.575	

Dans cette phase on va réaliser ces deux compositions témoins pour tirer les caractéristiques principales tel que :

- la compacité ;
- la maniabilité ;
- la résistance à la compression (7j, 14j, 28j) ;



- la résistance à la traction (28j) ;

Pour atteindre ce but on a réalisé 13 éprouvettes cylindriques ( $\phi = 16$ ,  $H=32$ ) cm pour chaque composition, réparties comme suit :

- (09) éprouvettes pour l'essai de compression simple à différents ages (7, 14 et 28 jours) ;
- (03) éprouvettes pour l'essai de traction par fendage ;

Les résultats des essais sont donnés dans les tableaux 1 et 2 :

**Tableau 1 : caractéristiques de la composition (BSD0)**

Dosage des éléments (Kg/m <sup>3</sup> )		Maniabilité (s)	$\rho_a$ (Kg/m <sup>3</sup> )	Compacité (%)	R <sub>c</sub> (MPa)			R <sub>t</sub> (MPa)
					7j	14j	28j	28j
Ciment	375	12	2200	93.6	12.75	18	22.5	2.4
Adjuvant	1.5							
Sable de dune	666.49							
Sable concassé	705.55							
Eau	217.89							

La désignation de cette formule conformément aux normes est : **BS 22.5 FP**

C'est un béton de sable de résistance caractéristique de 22.5 MPa, et de fluidité plastique.

**Tableau 2 : caractéristiques de la composition (BSDC0)**

Dosage des éléments (Kg/m <sup>3</sup> )		Maniabilité (s)	$\rho_a$ (Kg/m <sup>3</sup> )	Compacité (%)	R <sub>c</sub> (MPa)			R <sub>t</sub> (MPa)
					7j	14j	28j	28j
Ciment	375	15	2220	95.1	19.83	26.16	30	3.11
Adjuvant	1.5							
Sable de dune	666.49							
Sable concassé	282.22							
Gravillon	412.39							
Eau	215.63							

La désignation de cette formule conformément aux normes est : **BS 30 FP 3/8**

C'est un béton de sable de résistance caractéristique de 30 MPa, et de fluidité

plastique avec gravillon 3/8.

Sur la base des résultats des essais effectués, on constate clairement que les deux compositions présentent des résistances importantes, et de bonnes compacités ce qui montre que les grains sont bien arrangés suite à la correction granulaire.

### VII.3. Deuxième série d'essais :

(Étude des compositions témoins modifiées avec la poudrette de caoutchouc)

Dans cette phase, les compositions témoins (BSD0, BSDC0) seront modifiées par l'ajout de différents pourcentages (1, 2, 3, 4) % de la poudrette de caoutchouc, qui sera considérée comme addition.

Notons :

BSD PC : Béton de sable modifié à la poudrette de caoutchouc.

BSDC PC : Béton de sable chargé modifié à la poudrette de caoutchouc.

Les compositions réalisées sont données dans les tableaux suivants :

Tableau 3 : compositions BSD PC

Compositions	BSD PC 1%	BSD PC2%	BSDC P 3%	BSD PC 4%
Constituants (Kg/m <sup>3</sup> )				
Ciment	375	375	375	375
Adjuvant	1.5	1.5	1.5	1.5
Sable de dune	662.74	658.99	655.24	651.49
Sable concassé	705.55	705.55	705.55	705.55
Poudrette de caoutchouc	3.75	7.5	11.25	15
Eau	217.89	217.89	217.89	217.89



Tableau 4 : compositions BSDC PC

Compositions	BSDC PC 1%	BSDC PC2%	BSDC PC 3%	BSDC PC 4%
Constituants (Kg/m <sup>3</sup> )				
Ciment	375	375	375	375
Adjuvant	1.5	1.5	1.5	1.5
Sable de dune	662.74	658.99	655.24	651.49
Sable concassé	282.22	282.22	282.22	282.22
Gravillon	412.39	412.39	412.39	412.39
Poudrette de caoutchouc	3.75	7.5	11.25	15
Eau	215.63	215.63	215.63	215.63

Les résultats des essais sur ces compositions sont donnés dans les tableaux suivants :

Tableau 5 : Caractéristiques des compositions BSD PC

Caractéristiques	$\rho_{th}$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_a$ (Kg/m <sup>3</sup> )	Compacité (%)	Maniabilité (s)	R <sub>c</sub> (MPa)		R <sub>t</sub> (MPa)
					7j	28j	28j
Compositions							
BSD PC 1%	2109.37	2028.58	96.17	11	12.5	20	2.16
BSD PC 2%	2110.93	2034.98	96.4	10.5	10.5	15	1.62
BSD PC 3%	2113.47	2041.53	96.59	9.5	16.5	25	2.86
BSD PC 4%	2119.06	2051.64	96.86	8	11.25	17.5	1.86

Tableau 6 : Caractéristiques des compositions BSDC PC

Caractéristiques	$\rho_{th}$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_a$ (Kg/m <sup>3</sup> )	Compacité (%)	Maniabilité (s)	R <sub>c</sub> (MPa)		R <sub>t</sub> (MPa)
					7j	28j	28j
Compositions							
BSDC PC 1%	2187.5	2110.18	96.46	13.5	21.15	31.25	3.25
BSDC PC 2%	2164.06	2109.87	97.49	12	19.65	30	3.08
BSDC PC 3%	2148.43	2108.43	98.14	10	16.75	25	2.86
BSDC PC 4%	2125	2106.36	99.12	9.5	15	23.5	2.48

Les graphes représentant l'évolution des différentes caractéristiques en fonction de dosage en poudre de caoutchouc sont donnés ci-après :

VII.3.1. Compositions BSD PC :

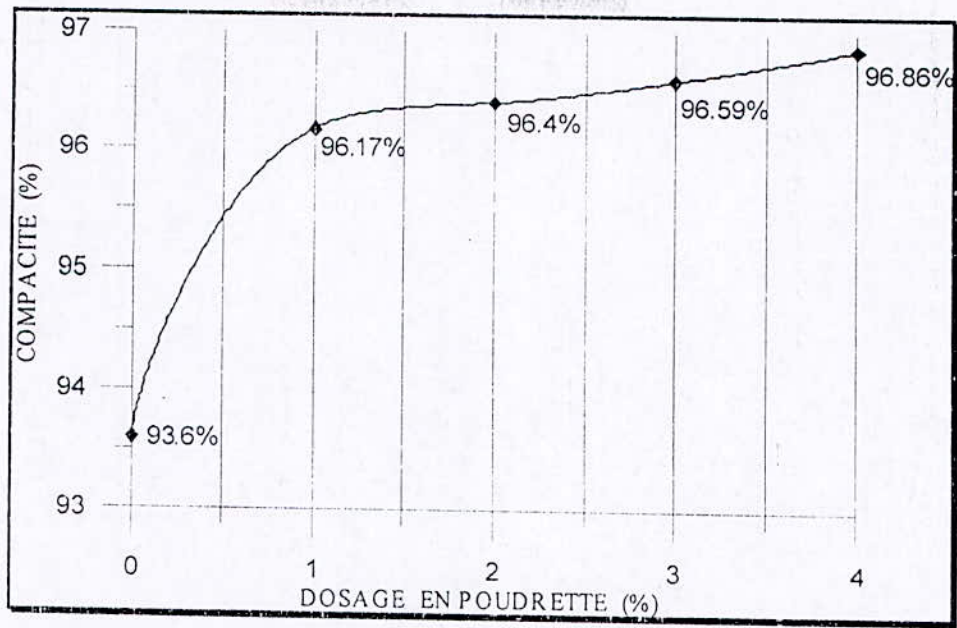


Figure 2 : Courbe de compacité en fonction de dosage en poudre de caoutchouc (BSD PC)

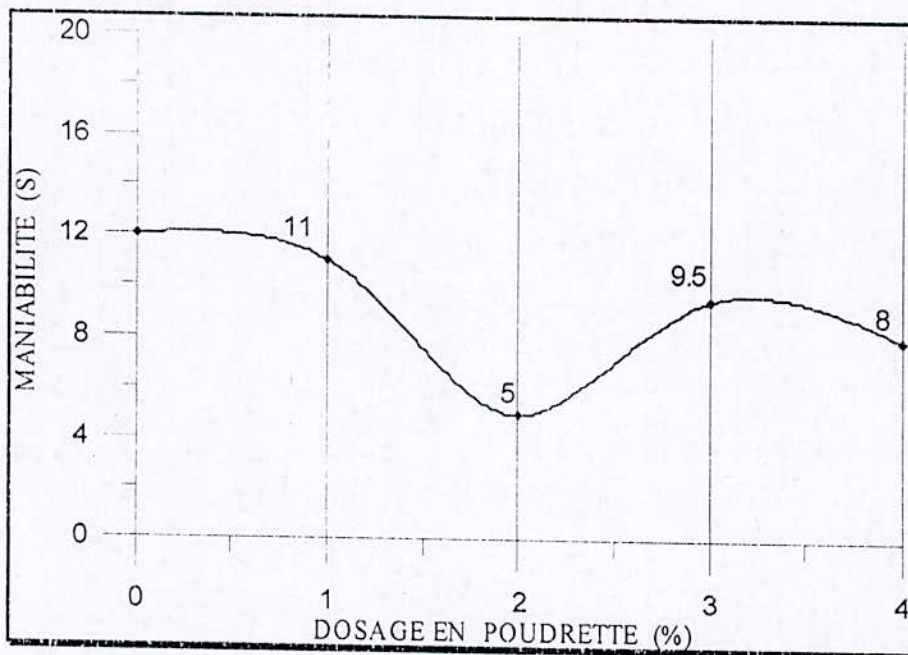


Figure 3 : Courbe de maniabilité en fonction de dosage en poudre de caoutchouc (BSD PC)



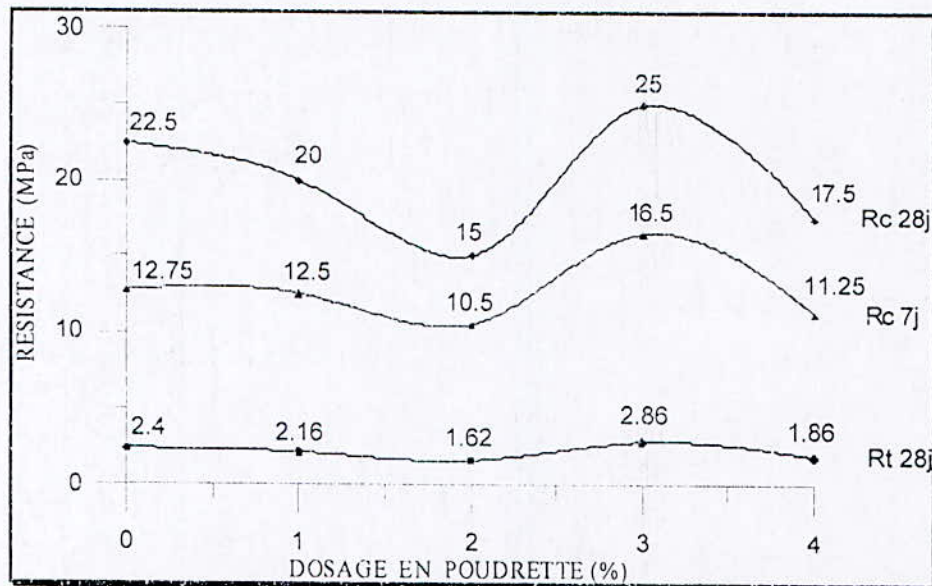


Figure 4 : Courbe de résistance en fonction de dosage en poudre de caoutchouc (BSD PC)

#### Interprétation des résultats :

❖ En faisant varier le pourcentage de poudre de caoutchouc de 0 à 4% par pas de 1%, on remarque que la compacité du béton augmente entre 0 et 1% d'ajout, ceci est justifié par le réarrangement des grains favorisé par la correction granulométrique par le sable de concassage, qui a une granulométrie étalée. Les vides inter-granulaires de sable de dune ont été occupés par les fillers de caoutchouc, ce qui diminue le volume des vides afin d'augmenter la compacité.

Cette augmentation de compacité est peu visible entre 1% et 4%, ceci est dû à la diminution du pourcentage des vides à remplir. Donc on peut parler d'une stabilisation de la compacité au delà de 1%.

❖ La maniabilité s'améliore lorsque le dosage en poudre augmente, ceci est justifié par la faible absorption d'eau par les particules de caoutchouc, ce qui conduit à un gain d'une quantité d'eau pour les autres constituants de béton, sans variation de rapport (E/C) qui reste fixe (E/C = 0.58), sauf pour la composition qui contient 2% de poudre qui a un rapport (E/C = 0.84), dû à un surdosage en eau par erreur.

❖ Des petites variations de résistance sont observées entre 0% et 3%, presque il y a une stabilisation de résistance, sauf au point 2% où elle présente une chute

considérable du au surdosage en eau. Au delà e 3% de poudrette, on remarque une chute de résistance, ceci est du à la mauvaise cohésion inter-granulaire favorisée par les particules de caoutchouc. La chute de résistance pour un dosage de 4% de poudrette est de l'ordre de 22.22%.

VII.3.2.Compositions BSDC PC :

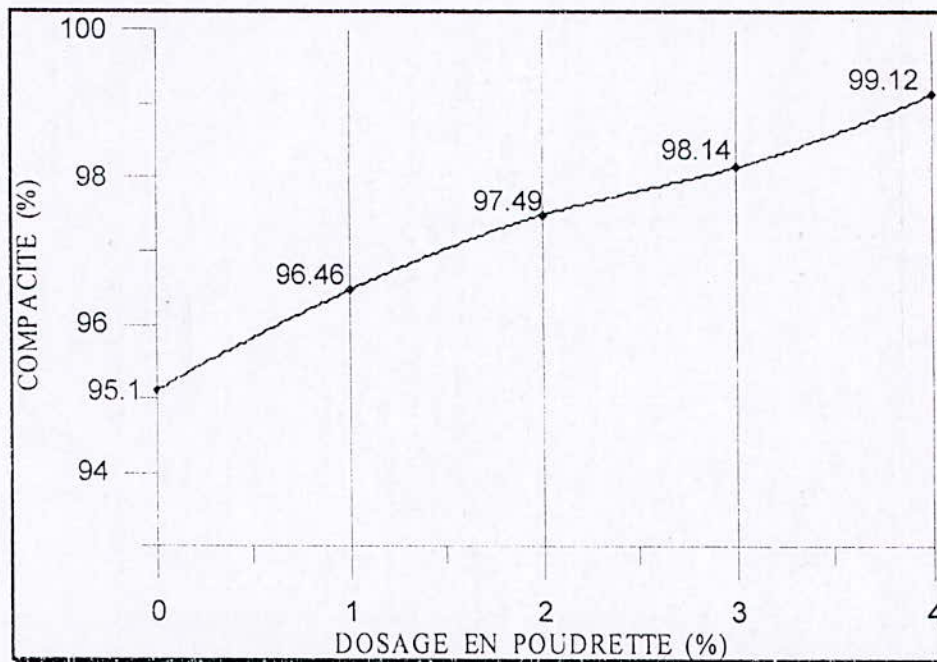


Figure 5 : Courbe de compacité en fonction de dosage en poudrette de caoutchouc (BSDC PC)

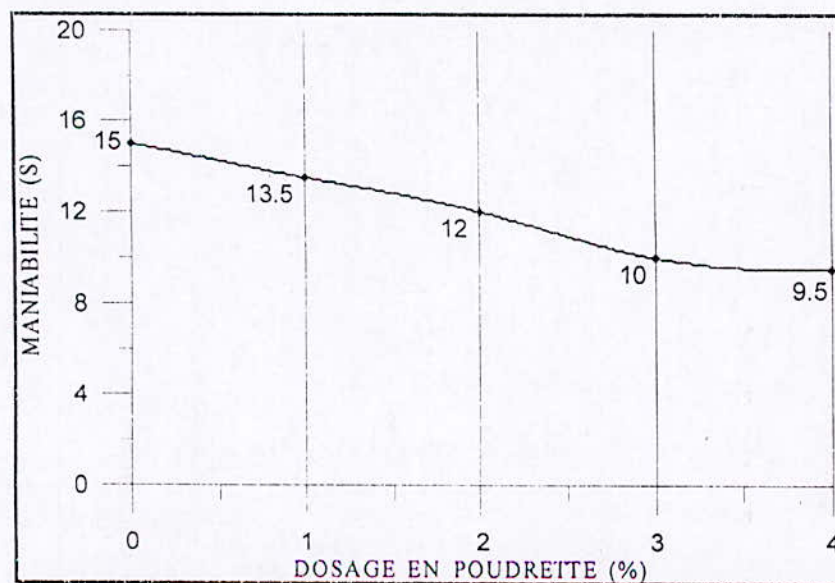


Figure 6 : Courbe de maniabilité en fonction de dosage en poudrette de caoutchouc (BSDC PC)



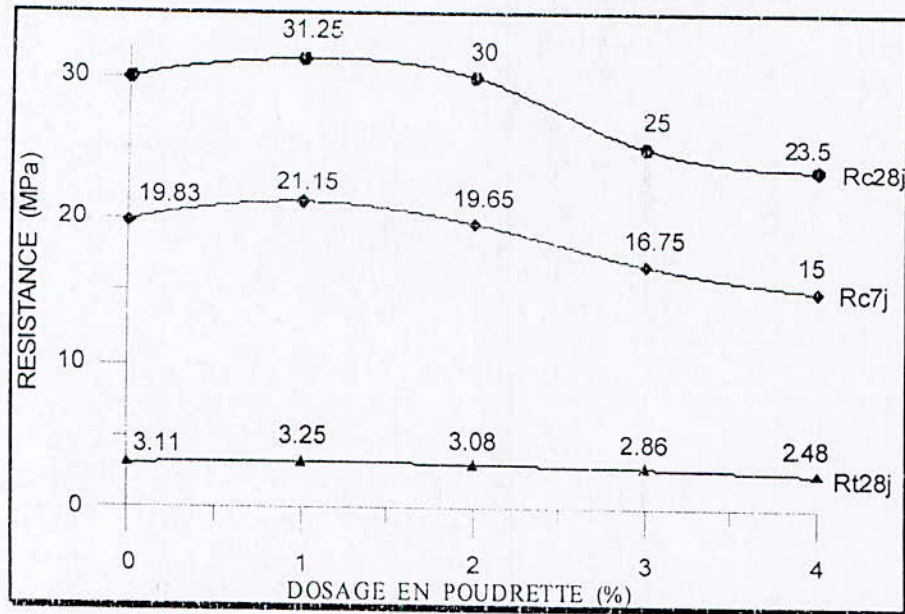


Figure 7 : Courbe de résistance en fonction de dosage en poudrette de caoutchouc (BSDC PC)

#### Interprétation des résultats :

❖ En traçant la courbe compacité-dosage en poudrette de caoutchouc, on remarque que la compacité augmente d'une manière presque uniforme avec l'augmentation de dosage en poudrette, pour atteindre au delà de 2% la valeur (97.49%), ceci permet de dire que les mélanges (BSDC PC 2%, BSDC PC 3%, BSDC PC 4%) sont optimisés dans leur squelette solide. Ceci est atteint lorsque les grains des deux sables trouvent une grande facilité de se réarranger grâce aux vides criés entre les grains de gravillon, afin que les fillers de caoutchouc interviennent pour remplir les vides inter-granulaires des deux sables, et former un mélange compact (ferme).

❖ De la même façon que les mélanges (BSD PC), la maniabilité est améliorée avec l'augmentation de dosage en poudrette, grâce à la mal absorption d'eau par les particules de caoutchouc.

❖ On remarque que la résistance est presque stable entre 0% et 2%. Au delà de 2% une chute de résistance est observée, ceci est dû au manque de cohésion inter-granulaire provoquée par les particules de caoutchouc. La chute de résistance pour un dosage de 4% de poudrette est de l'ordre de 21.66%.

#### VII.4. Conclusion :

Cette étude a montré que l'ajout de la poudrette de caoutchouc même avec des faibles pourcentages au béton de sable, est déconseillé quand la mécanique de résistance est le but principal. L'estimation de chute de résistance pour un dosage de 4% de poudrette de caoutchouc est de 22%.

Cependant une possible (éventuelle) utilisation d'ajout de poudrette de caoutchouc devait remplir autre rôle que la performance mécanique a sens (résistance à la compression, et résistance à la traction).



# *CHAPITRE : VIII*

*COMPORTEMENT DE  
BÉTON DE SABLE MODIFIÉ  
AVEC LA POUDRETTE DE  
CAOUTCHOUC*

### VIII.1. Introduction :

L'analyse des déformations d'une éprouvette de béton permet de mettre en évidence trois types de variations de longueur :

- ♦ Une variation de longueur sans chargement (le retrait) ;
- ♦ Une variation de longueur fonction du chargement mis en œuvre (loi de comportement contrainte-déformation classique) ;
- ♦ Une variation de longueur pour un même chargement fonction du temps, cette dernière est définie par la courbe de fluage.

Dans cette phase on s'intéresse sur la détermination de principaux paramètres rhéologiques, et ceci en déterminant la loi contrainte-déformation longitudinale et transversale.

### VIII.2. Comportement du béton en compression :

#### ❖ Module d'élasticité en compression :

Il existe des relations plus ou moins empiriques entre le module de Young et la résistance à la compression. La mesure demeure cependant nécessaire dans bien des cas, surtout depuis l'avènement des bétons légers.

Comme cette mesure s'accompagne presque toujours de la détermination d'une courbe contrainte-déformation jusqu'à la rupture, il est donc possible de connaître également la déformation relative du béton pour une contrainte quelconque située au-delà de la phase élastique jusqu'à la contrainte de rupture.

Pour un même béton, le module d'élasticité varie de quelques pourcents avec la vitesse de montée en charge. Le module croît suivant une loi logarithmique avec le temps de durcissement, il varie également avec la composition du béton.

On définit parfois des modules sécants : pentes des droites joignant l'origine à un point donné de la courbe contrainte-déformation.

En compression, les écarts avec le module d'élasticité vrai ne sont pas significatifs jusqu'à 10% de la charge de rupture ; ils restent faibles jusqu'à 40% environ de cette dernière puis deviennent rapidement très sensibles.



## ❖ Coefficient de poisson :

Sur la même éprouvette que celle utilisée pour la détermination du diagramme contrainte-déformation longitudinale, il est possible de procéder simultanément à la détermination du diagramme contrainte-déformation transversale. Le rapport de la déformation transversale à la déformation longitudinale, sous une même contrainte de compression, donne la valeur du coefficient de poisson.

La valeur du coefficient de poisson aux faibles charges décroît avec l'âge du béton, jusqu'à des valeurs de 0,20 à 0,15.

La mesure des déformations transversales se réalise assez bien à l'aide de deux jauges à fil résistant collées en vis à vis et perpendiculairement à l'axe du cylindre.

## ❖ Relation module d'élasticité-résistance caractéristique du béton :

Les différentes règles proposent une relation en puissance 1/3 de la résistance à la rupture. Les règles BAEL 91 s'appliquent aux bétons de sable lorsque le dosage en CPA est supérieur à 300 kg/m<sup>3</sup>. Les bétons de sable sont plus déformables que les bétons classiques, le module de déformation instantanée peut être évalué au moyen de la formule :

$$E_{ij} = 8100 \times f_{cj}^{1/3} \quad (\text{en MPa})$$

Au lieu de  $E_{ij} = 11000 \times f_{cj}^{1/3}$  pour un béton classique, où « j » représente l'âge du béton.

On déduit alors le module différé donné par la formule :

$$E_{vj} = 1/3 \times E_{ij} = 2700 \times f_{cj}^{1/3} \quad (\text{en MPa})$$

Il peut par contre devenir nécessaire de connaître la résistance réelle (expérimentalement) et le comportement du béton en traction au travers de sa déformabilité ou d'une notion comme l'énergie de fissuration.

Pour mieux caractériser et donner une idée sur le comportement des bétons de sable modifiés à la poudrette de caoutchouc, on a effectué un essai supplémentaire sur les compositions :

(BSD0, BSD PC 3%) et (BSDC0, BSDC PC 2%, BSDC PC 3%)

Dans ce qui suit, nous allons déterminer les déformations relatives sous charge, afin d'apprécier la loi de comportement (contrainte-déformation), le module

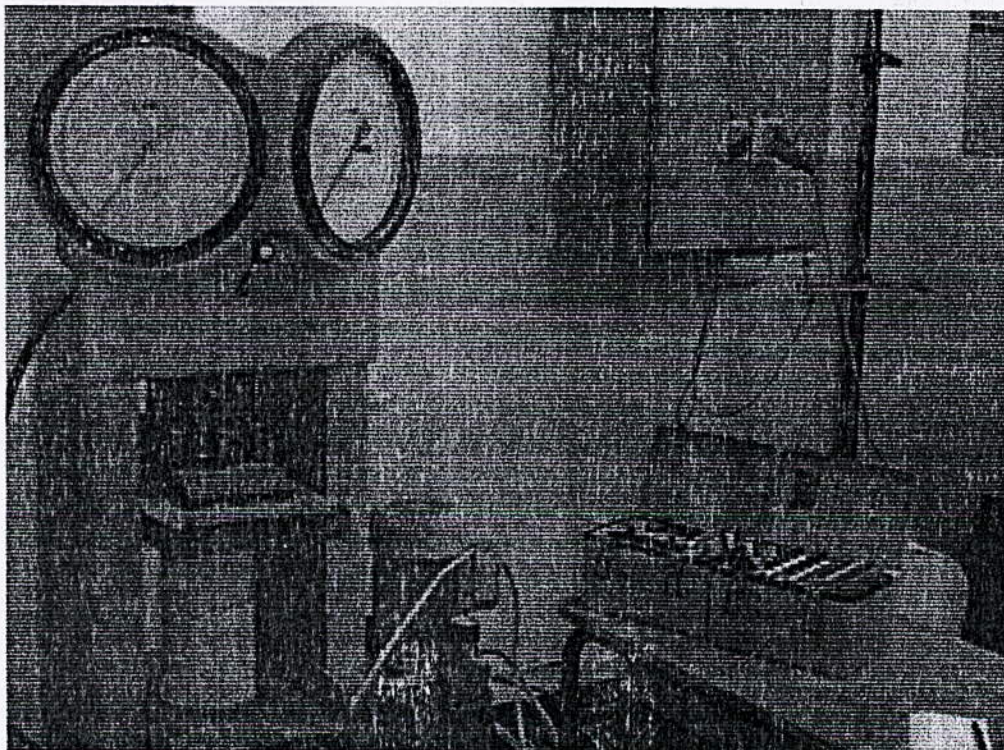


d'élasticité et finalement le coefficient de Poisson.

Pour cela nous avons utilisé des éprouvettes cylindriques ( $\phi = 16$ ,  $H=32$ ) cm. Ces éprouvettes sont équipées de jauges électriques permettant la mesure de la déformation dans les deux sens longitudinal et transversal.

**Remarque :**

Cette phase d'essais a été réalisée au niveau de laboratoire de construction et d'environnement de l'école nationale polytechnique.



**Figure 1 : Eprouvette équipée de jauges placée entre les plateaux de la presse.**

L'essai consiste à placer une éprouvette entre les deux plateaux de la presse et une charge croissante par palier de 20 KN est alors appliquée avec une vitesse moyenne de 10 KN/seconde. Pour chaque incrément de charge ; on note à la fois la charge appliquée et les déformations longitudinale et transversale.

Les résultats de ces essais pour les différentes compositions sont représentés graphiquement dans (Annexe B).

Les valeurs des modules d'élasticité tangents à l'origine et les coefficients de Poisson sont données dans les tableaux suivants :



## VIII.3. Module d'élasticité :

Tableau 1 : Module d'élasticité des compositions BSD PC :

Compositions	Module d'élasticité (MPa)
BSD0	14792.9
BSD PC 3%	15822.8

Tableau 2 : Module d'élasticité des compositions BSDC PC :

Compositions	Module d'élasticité (MPa)
BSDC0	26385.2
BSDC PC 2%	20491.8
BSDC PC 3%	16722.4

## VIII.4. Coefficient de poisson :

Tableau 3 : Coefficient de poisson des compositions BSD PC :

Compositions	Coefficient de poisson
BSD0	0.110
BSD PC 3%	0.220

Tableau 4 : Coefficient de poisson des compositions BSDC PC :

Compositions	Coefficient de poisson
BSDC0	0.205
BSDC PC 2%	0.160
BSDC PC 3%	0.365

## VIII.5. Interprétation des résultats :

## Analyse des déformations (BSDC0) :

En traçant les courbes contrainte-déformation longitudinale, on remarque qu'elles comportent chacune trois phases :

*1<sup>ère</sup> phase* : Comportement élastique quasi-linéaire du béton.

Dans cette phase le comportement des bétons est quasi-linéaire où bilinéaire, jusqu'à un taux de déformation (0.535 ‰ qui correspond à une contrainte



$\sigma = 15 \text{ MPa}$  pour la composition BSDC0). La pente à l'origine de cette courbe (droite) est le module de déformation longitudinale à l'origine (loi de HOOK).

$$\sigma = E \times \varepsilon \qquad E_{b0} = \text{tg} \alpha_0 = \text{cst}$$

*2<sup>ème</sup> phase:* une allure parabolique jusqu'à un seuil correspondant à la contrainte maximale, le béton a un comportement plastique où on observe le développement de la microfissuration jusqu'à la rupture, dans ce cas on définit le module d'élasticité sécant ; pentes des droites joignant l'origine à un point donné de l'allure parabolique.

*3<sup>ème</sup> phase:* caractérisée par une fissuration généralisée, propagation de la rupture et développement des surfaces de fractures, on remarque une augmentation de la déformation en même temps que la contrainte de rupture diminue.

Ces phases sont aussi observées dans le cas de béton classique. De ce fait on peut dire que les compositions présentent un comportement analogue à celui des bétons classiques vis-à-vis des déformations sous charges monotones.

Cette allure s'explique par l'interface entre la pâte de ciment et les granulats à cause de la différence de ces propriétés mécaniques. Le développement du micro fissures à ces interfaces réduit la surface effective résistante à la charge appliquée de sorte que la contrainte locale est plus importante que la contrainte moyenne calculée sur la totalité de la section droite de l'éprouvette. Ces changements signifient que la déformation augmente plus vite que la contrainte nominale appliquée, en sorte que la courbe contrainte-déformation présente une courbure de plus en plus prononcée, avec un comportement pseudo élastique apparent, et lorsque la contrainte dépasse une certaine limite (20 MPa pour BSDC0), la courbe s'incurve à une vitesse de plus en plus grande, ce qui est presque analogue à la fissuration de mortier, les fissures à l'interface continuent jusqu'à la charge maximale. Le nombre élevé de ces fissures engendre une diminution importante de la surface effective qui ne peut résister même à des charges inférieures à la charge maximale, c'est pourquoi d'ailleurs on remarque une continuité de la déformation même avec une réduction de la charge.

Cette allure est aussi observée dans la courbe contrainte-déformation transversale sauf que les seuils sont beaucoup plus restreints.



tronconique (formation de cône à la rupture) pour le béton BSDC PC.

#### **Coefficient de Poisson :**

Le coefficient de Poisson est défini comme le rapport entre les deux déformations (transversale et longitudinale), il sera déterminé à titre complémentaire en traçant les courbes déformations transversales en fonction des déformations longitudinales :

On remarque que les courbes présentent chacune deux phases :

*1<sup>ère</sup> phase :* les courbes ont une forme presque droite, montrant une proportionnalité entre la déformation longitudinale et la déformation transversale et correspondant à la partie quasi linéaire élastique.

*2<sup>ème</sup> phase :* les courbes deviennent de plus en plus paraboliques et convergent jusqu'à la rupture.

Pour déterminer le coefficient de Poisson, on trace les courbes tronquées de déformation transversale en fonction de la déformation longitudinale.

#### **VIII.6. Conclusion :**

Les modules d'élasticité de béton de sable de dune corrigé uniquement avec le sable de concassage sont plus petits que ceux du béton de sable chargé, qui eux sont comparables à ceux d'un béton ordinaire, car le module est fonction du diamètre de plus gros granulats.

Le module du béton chargé témoin est plus important que ceux du béton chargé modifié par la poudrette de caoutchouc.

Pour le béton de sable le module augmente avec l'ajout de la poudrette de caoutchouc, de même pour le coefficient de Poisson.

---

# CONCLUSION GÉNÉRALE

---



## Conclusion générale

Le but de ce travail est l'étude de l'influence d'ajout de poudrette de caoutchouc sur le béton de sable de dune.

L'étude expérimentale sur les compositions testées a permis de montrer que l'ajout de poudrette de caoutchouc même avec des faibles pourcentages au béton de sable, est déconseillé quand la mécanique de résistance est le but principal. L'estimation de chute de résistance pour un dosage de 4% de poudrette de caoutchouc est de l'ordre de 22%.

Cependant une possible (éventuelle) utilisation d'ajout de poudrette de caoutchouc devrait remplir autre rôle que la performance mécanique a<sup>un</sup> sens (résistance à la compression, et résistance à la traction).

Les modules d'élasticité de béton de sable de dune corrigé uniquement avec le sable de concassage sont plus petits que ceux du béton de sable chargé, qui eux sont comparables à ceux d'un béton ordinaire, car le module est fonction du diamètre de plus gros granulat.

Le module du béton chargé témoin est plus important que ceux du béton chargé modifié par la poudrette de caoutchouc.

Pour le béton de sable le module augmente avec l'ajout de la poudrette de caoutchouc, de même pour le coefficient de Poisson.

Pour améliorer les performances mécaniques de béton de sable modifié à la poudrette de caoutchouc, on formule le souhait que d'autres ajouts tel que les fibres métalliques ou les fillers calcaires puissent être étudiées dans les travaux à venir.

ANNEXE A



# GLENIUM' 21

1.265

## Superplastifiant haut réducteur d'eau pour béton à faible E/C et hautes performances

### Description

Le GLENIUM 21 est un adjuvant non chloré d'une nouvelle intrinsèque du génération chimique à base d'éther polycarboxylique modifié. Cet adjuvant a été développé pour l'utilisation dans l'industrie du béton où haute qualité, durabilité et performances long terme, mécaniques initiales et finales élevées sont requises.

### La nouvelle chimie du GLENIUM

Le GLENIUM se différencie des superplastifiants traditionnels par son action nouvelle et originale qui améliore de façon très significative le pouvoir dispersant sur le ciment. Cette nouvelle structure chimique agit sur le grain de ciment par répulsion électrostatique et effet stérique, c'est à dire en créant un obstacle physique au rapprochement des particules de ciment. L'état dispersé est ainsi amélioré. De plus, cette réaction est la combinaison de deux actions successives. Dès l'incorporation du GLENIUM dans le mélange seconde est présente mais inactive. L'hydratation du ciment, qui se déroule normalement, fait évoluer le pH du mélange vers la basicité, ce qui provoque la libération progressive des molécules complémentaires. Celles-ci travaillent de la même manière que les premières et prolongent donc l'état de dispersion évitant ainsi la floculation et donc le raidissement précoce du mélange.

### Domaines d'application

Le champ d'application du GLENIUM 21 s'étend du béton prêt-à-emploi à la préfabrication. En effet ses performances doit être permettent de réduire le rapport E/C, en fabriquant un béton maniable qui conservera son ouvrabilité et obtiendra de fortes différé, c'est- performances mécaniques à jeune âge.

### Propriétés



EN 934.2

Marque NF  
cf. Rp NF 085

Le GLENIUM 21 apporte les avantages suivants au niveau de la mise en place, des performances et de la qualité

béton :

#### augmente

- la résistance à la compression à jeune âge et à long terme,
- la résistance à la flexion à jeune âge et à long terme,
- le module d'élasticité,
- l'adhérence sur les aciers,
- la résistance à la carbonatation,
- l'imperméabilité,
- la résistance aux agressions atmosphériques.
- la qualité des parements et de la texture du béton.

#### diminue

- la vibration,
- le retrait,
- le risque de fissuration,
- le fluage. cimentaire, une première partie active agit immédiatement

### Caractéristiques

• Aspect	liquide
• Couleur	brun
• Masse volumique (MA 002)	1,06 ± 0,02 g/cm <sup>3</sup>
• pH (MA003)	7,5 ± 1,5
• Teneur en chlorures (MA 004)	< 0,1 %
• Transport	non classé
• Etiquetage	pas de symbole exigé

### Mode d'emploi

Le GLENIUM 21 est un adjuvant pour béton qui incorporé isolément. L'effet optimal est obtenu par incorporation du GLENIUM 21 dans le béton en à-dire après l'addition de 70 % de l'eau de gâchage dans le malaxeur. Eviter d'ajouter le GLENIUM 21 sur les granulats.

Le GLENIUM 21 permet d'obtenir des bétons maniables avec des très fortes réductions d'eau, ce qui garantit donc des températures  
bétons de haute qualité.

### **Recommandations**

En cas de gel, réchauffer le produit jusqu'à une température proche de + 30°C, et agiter mécaniquement .





## GLENIUM® 21

### Compatibilité

Le GLENIUM 21 est compatible avec la majorité des ciments. Le GLENIUM 21 n'est pas compatible avec certains plastifiants et superplastifiants. Consultez votre représentant local MBT pour toute synergie.

### Dosage

#### Plage normale d'utilisation

0,3 à 2,0 % du poids du ciment, soit 0,28 à 1,89 L pour 100 kg de ciment.

Pour d'autres utilisations, consultez votre représentant local MBT.

### Conditionnement

Container de 1000 L, fût de 210 L, bidon de 10 L ou vrac.

### Stockage

Il est recommandé de stocker le GLENIUM 21 dans des conditions de températures supérieures à + 5°C.

MBT France a couvert sa responsabilité civile tant en exploitation qu'après nos

livraison de ses produits par une police d'assurance souscrite auprès de la

Compagnie GERLING FRANCE. Les garanties de cette police sont complétées par modifier à tout moment le contenu de celles-ci.

la police "parapluie" responsabilité civile du Groupe V.I.A.G. souscrite auprès des sociétés suisses d'assurances WINTERTHUR et de GERLING KONZERN de Zürich.

Nos fiches techniques ont pour objectif de vous conseiller d'après

connaissances les plus récentes, nous nous réservons donc le

*L'emploi des produits doit être adapté aux conditions spécifiques à chaque situation. Pour toute précision complémentaire, nous vous conseillons de prendre contact avec l'une de nos agences MBT France.*

### MBT France

Z.I. Petite Montagne Sud  
10, rue des Cévennes  
Lisses  
91017 Evry Cedex

Tél.: 01 69 47 50 00 Fax : 01 60 86  
06 32

Site Internet : <http://www.mbt.fr>



1000000000

1000000000

ANNEXE B



Composition (BSDC0) :

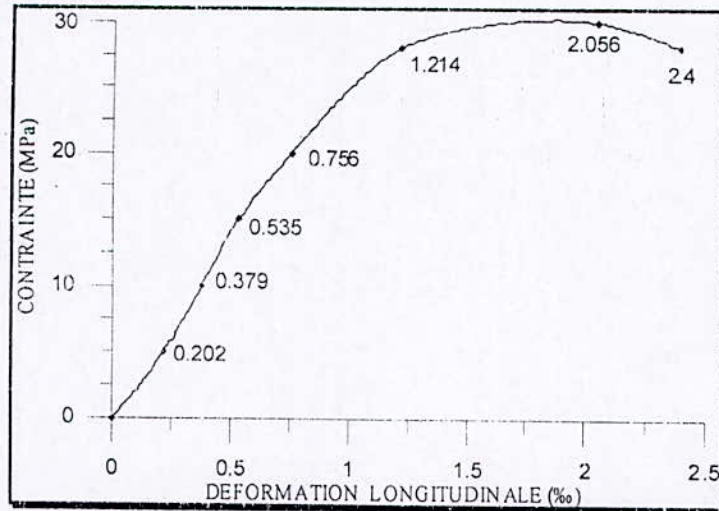


Figure 1 : Courbe contrainte-déformation longitudinale (BSDC0)

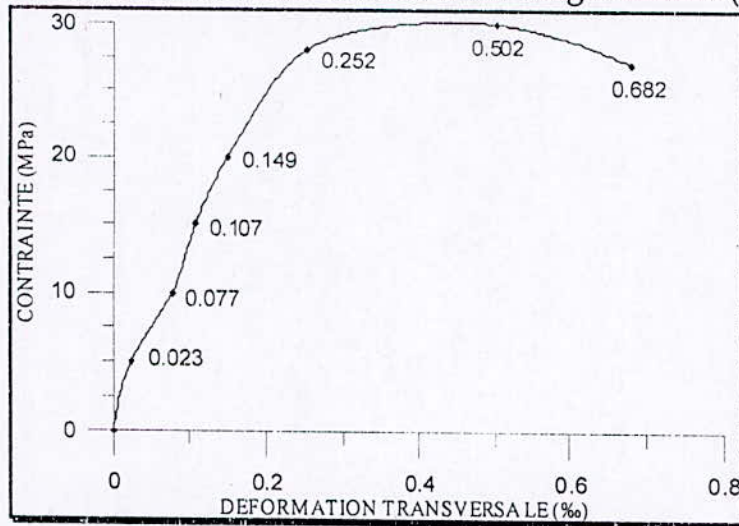


Figure 2 : Courbe contrainte-déformation transversale (BSDC0)

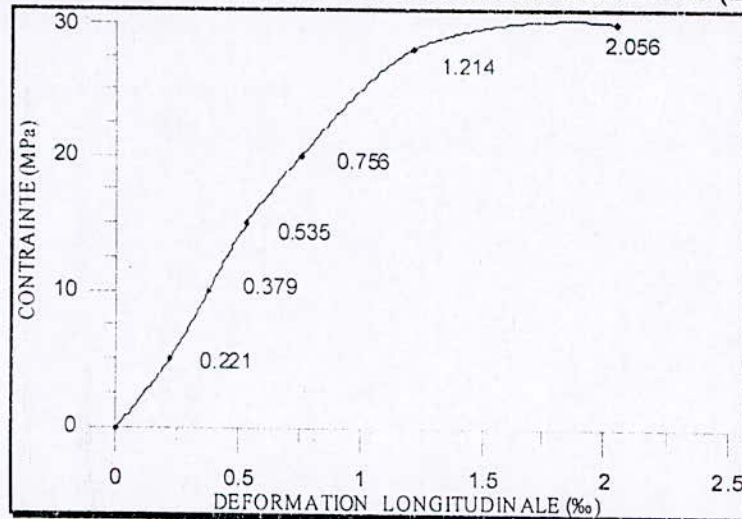


Figure 3 : Courbe contrainte-déformation longitudinale tronquée (BSDC0)

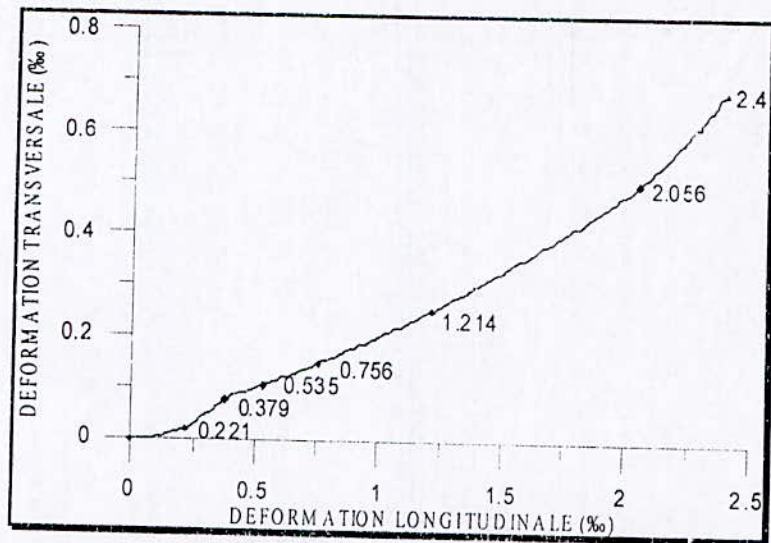


Figure 4 : Courbe déformation transversale en fonction de la déformation longitudinale (BSDC0)

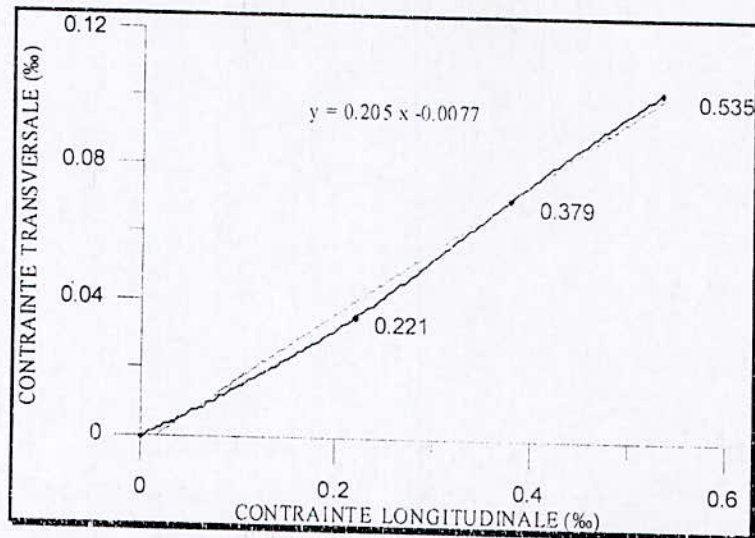


Figure 5 : Courbe déformation transversale en fonction de la déformation longitudinale tronquée (BSDC0)



Composition (BSDC PC 2%) :

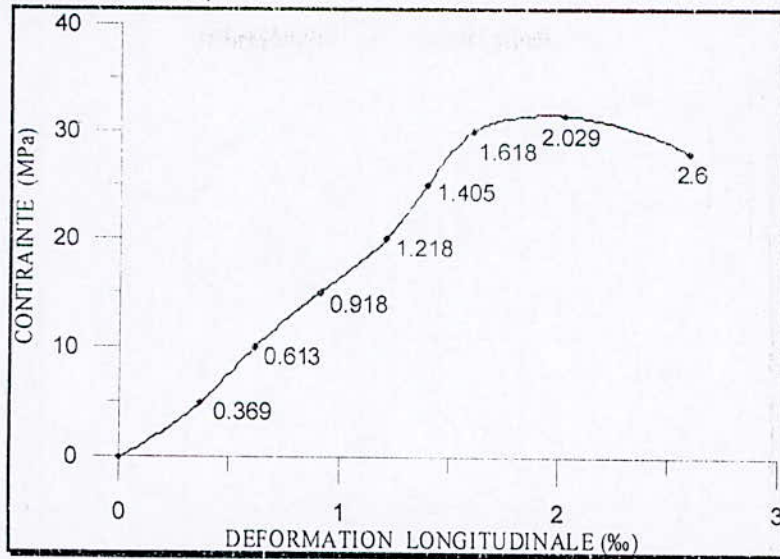


Figure 6 : Courbe contrainte-déformation longitudinale (BSDC PC 2%)

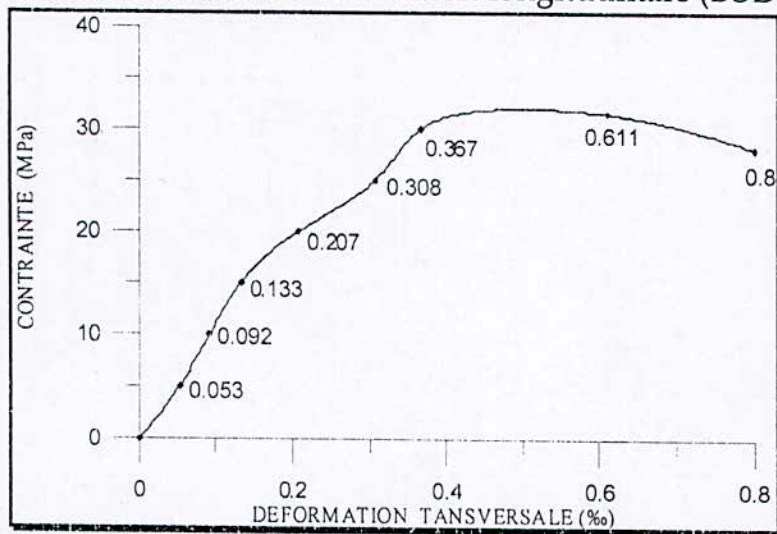


Figure 7 : Courbe contrainte-déformation transversale (BSDC PC 2%)

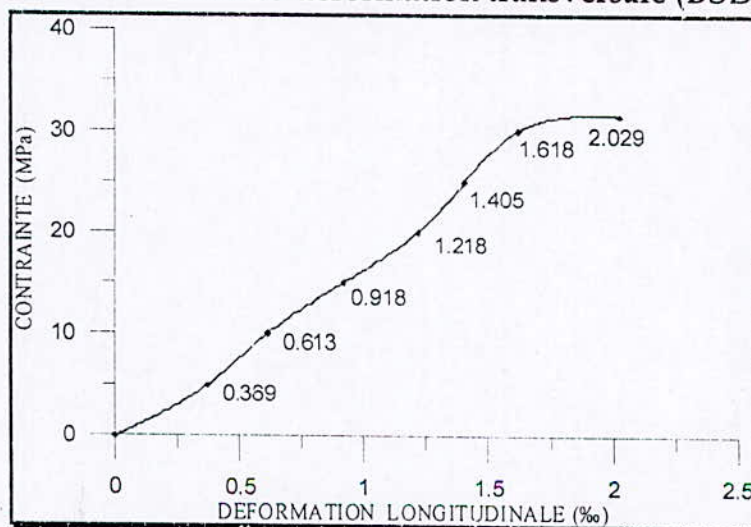


Figure 8 : Courbe contrainte-déformation longitudinale tronquée (BSDC PC 2%)

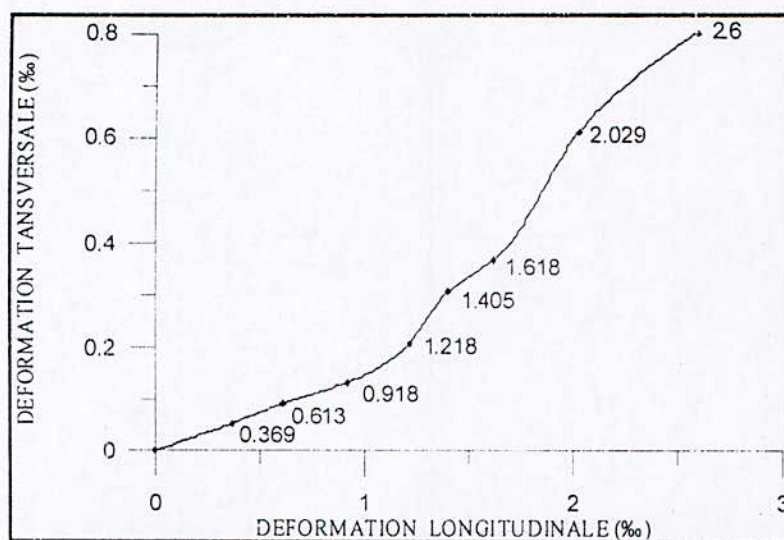


Figure 9 : Courbe déformation transversale en fonction de la déformation longitudinale (BSDC PC 2%)

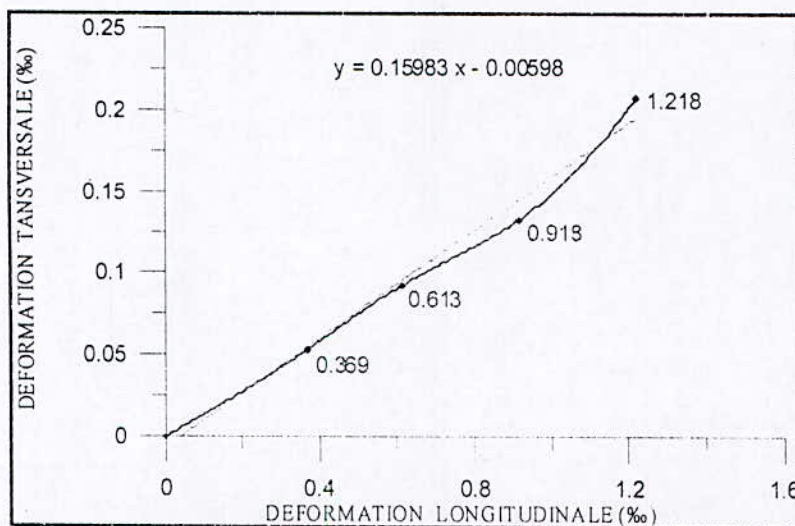


Figure 10 : Courbe déformation transversale en fonction de la déformation longitudinale tronquée (BSDC PC 2%)



Composition (BSDC PC 3%) :

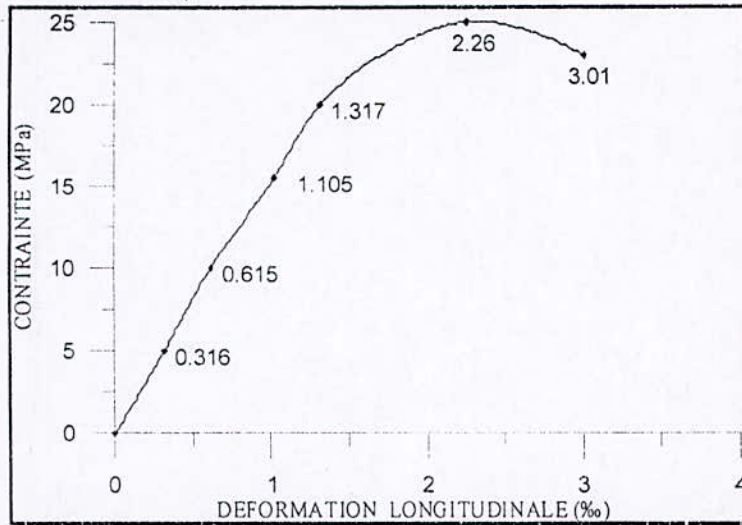


Figure 11 : Courbe contrainte-déformation longitudinale (BSDC PC 3%)

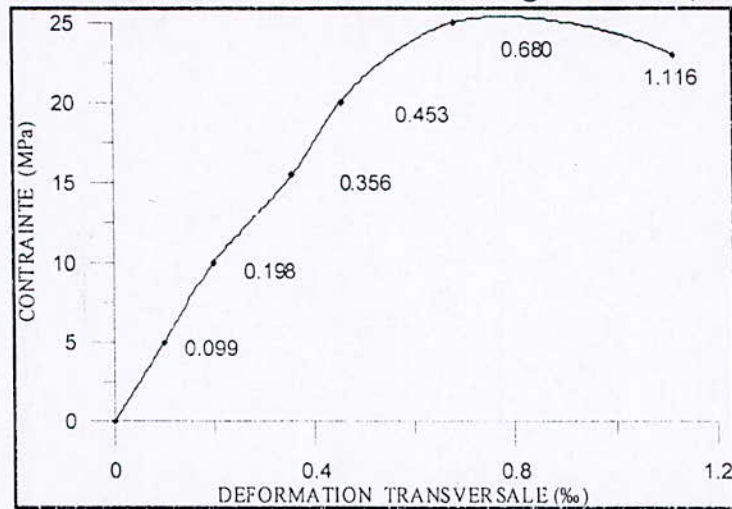


Figure 12 : Courbe contrainte-déformation transversale (BSDC PC 3%)

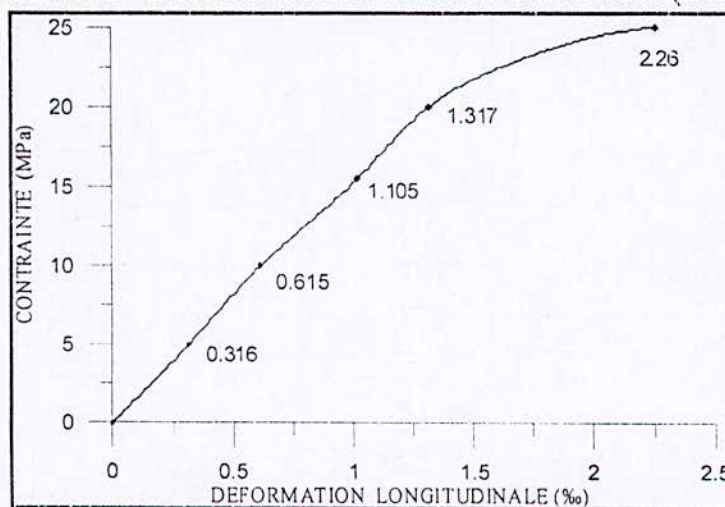


Figure 13 : Courbe contrainte-déformation longitudinale tronquée (BSDC PC 3%)

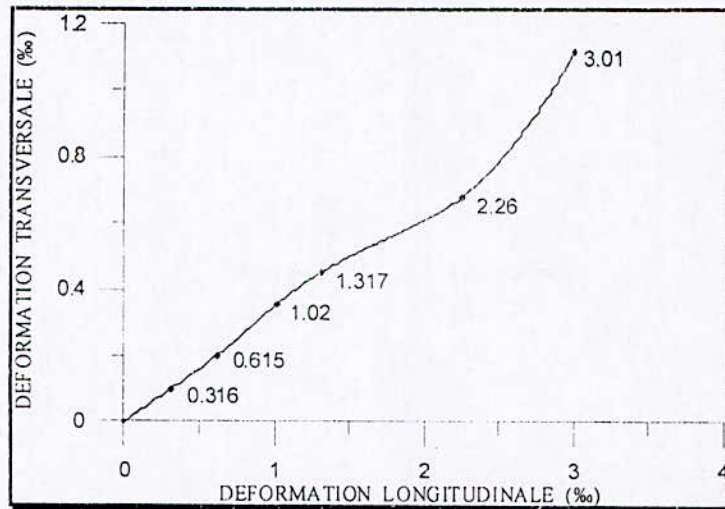


Figure 14 : Courbe déformation transversale en fonction de la déformation longitudinale (BSDC PC 3%)

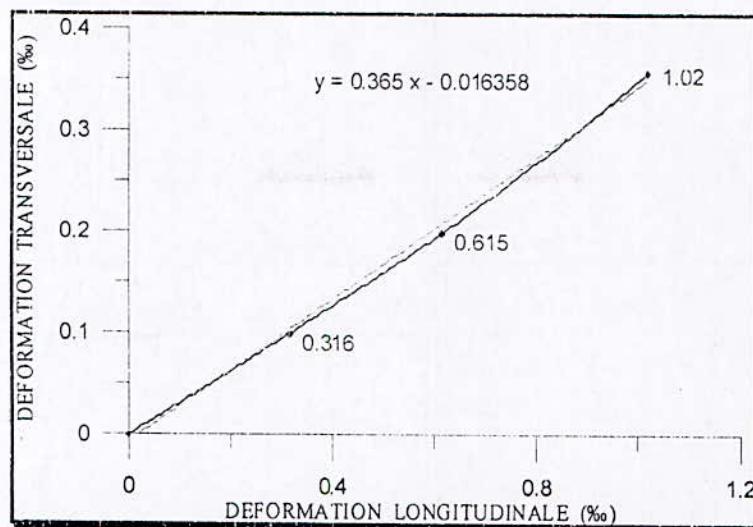


Figure 15 : Courbe déformation transversale en fonction de la déformation longitudinale tronquée (BSDC PC 3%)



Composition (BSD0) :

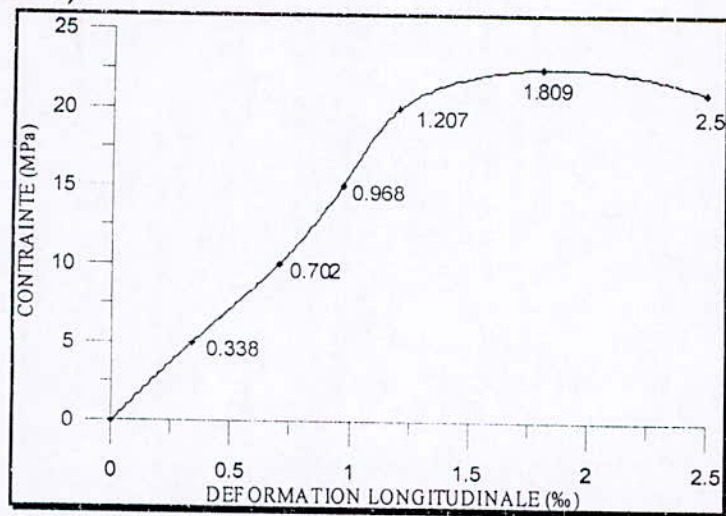


Figure 16 : Courbe contrainte-déformation longitudinale (BSD0)

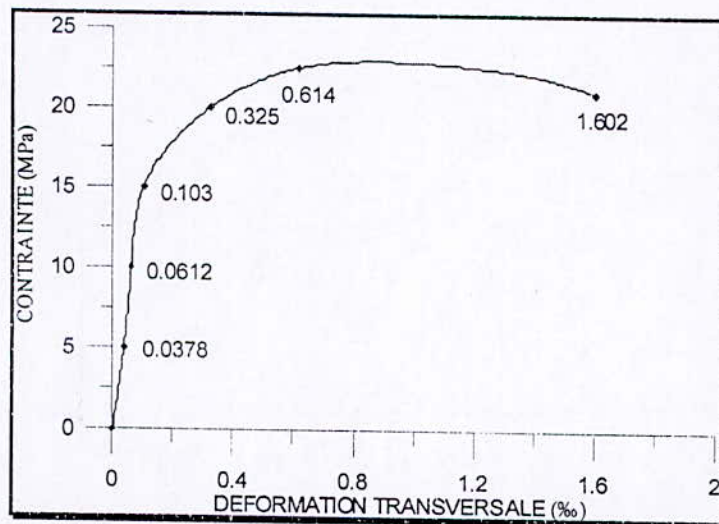


Figure 17 : Courbe contrainte-déformation transversale (BSD0)

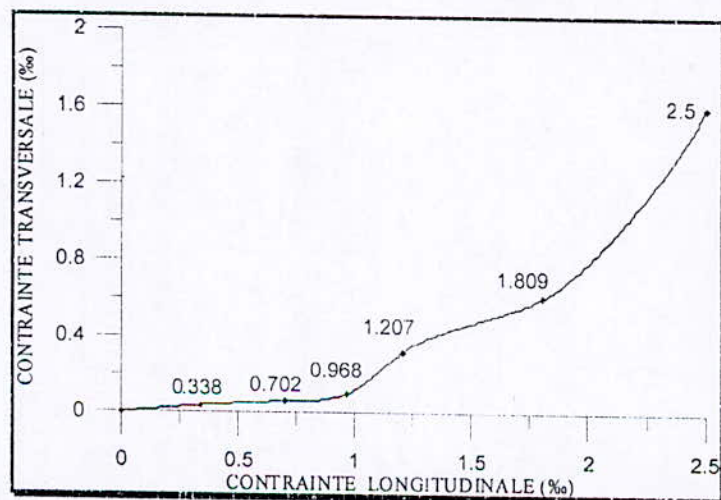


Figure 18 : Courbe déformation transversale en fonction de la déformation longitudinale (BSD0)

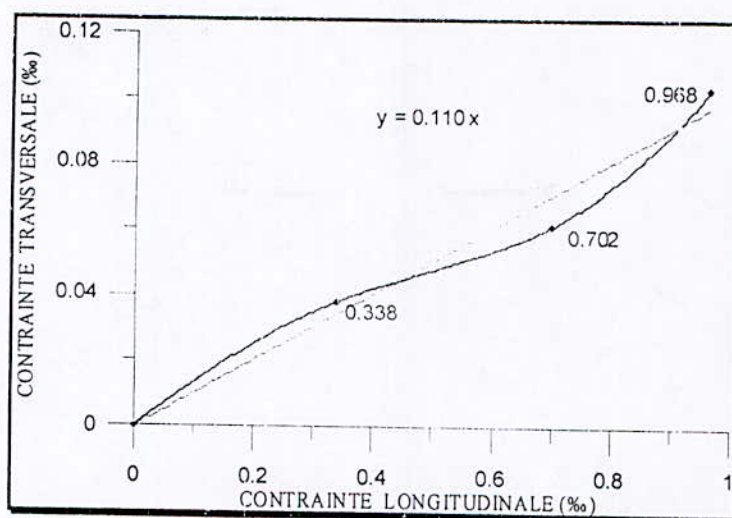


Figure 19 : Courbe déformation transversale en fonction de la déformation longitudinale tronquée (BSD0)  
Composition (BSD PC 3%) :

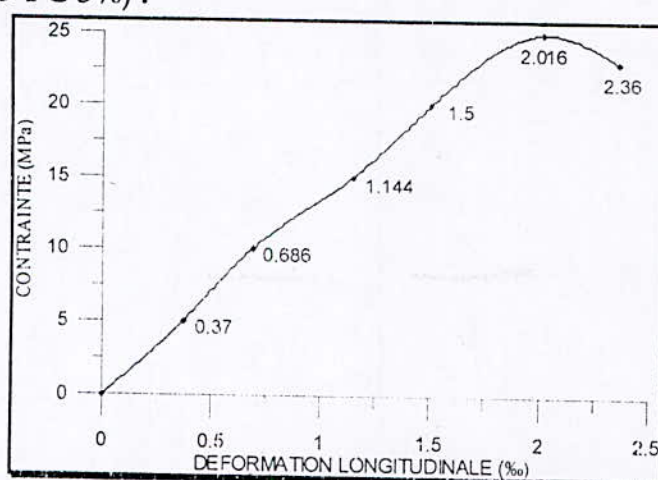


Figure 20 : Courbe contrainte-déformation longitudinale (BSD PC 3%)

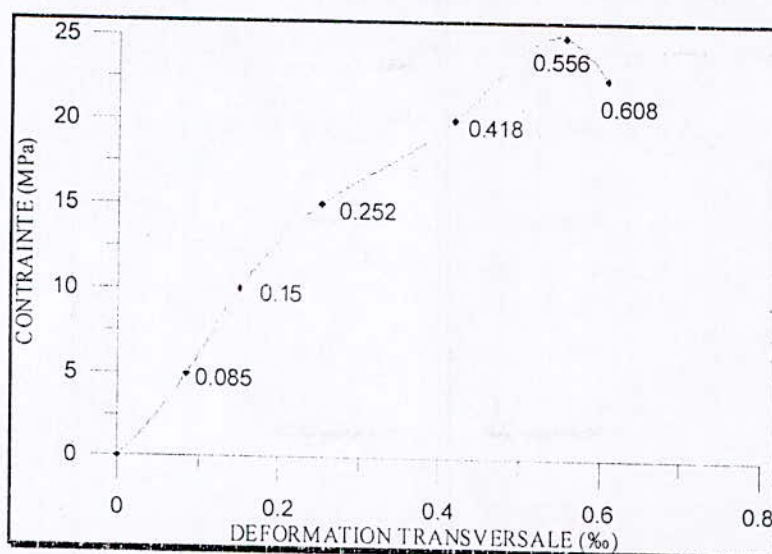


Figure 21 : Courbe contrainte-déformation transversale (BSD PC 3%)



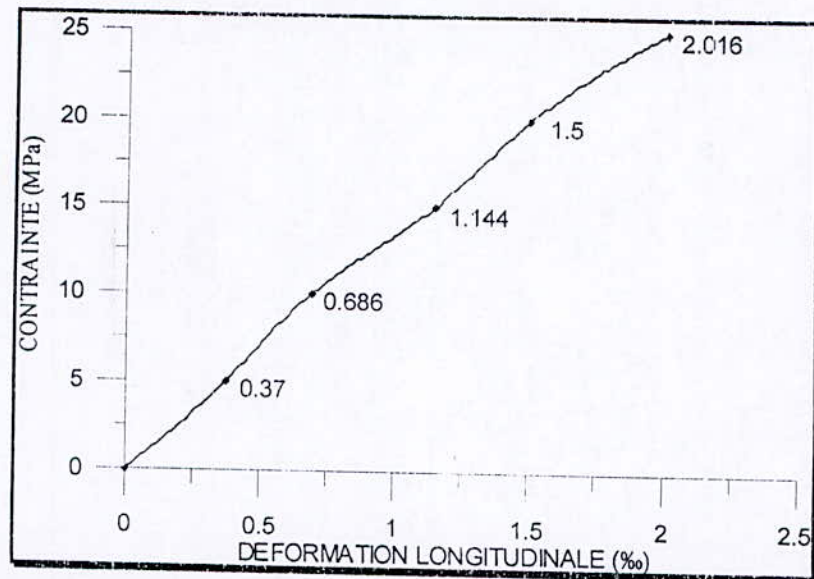


Figure 22 : Courbe contrainte-déformation longitudinale tronquée (BSD PC 3%)

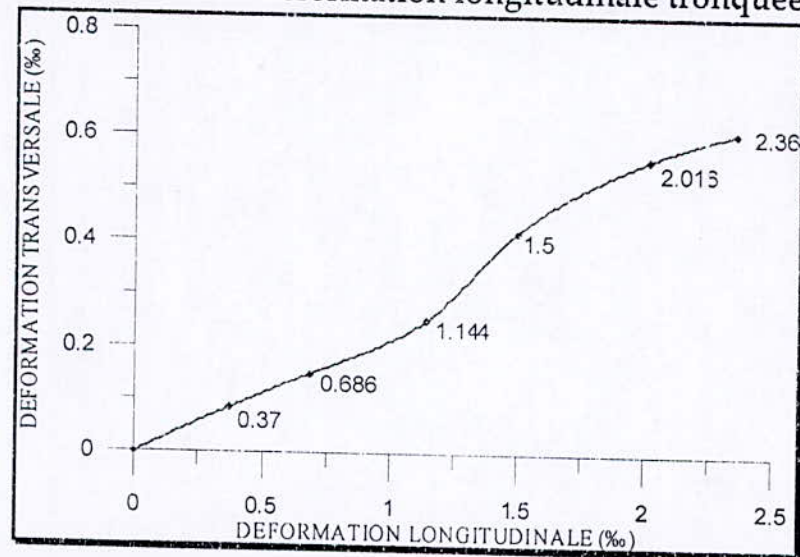


Figure 23 : Courbe déformation transversale en fonction de la déformation longitudinale (BSD PC 3%)

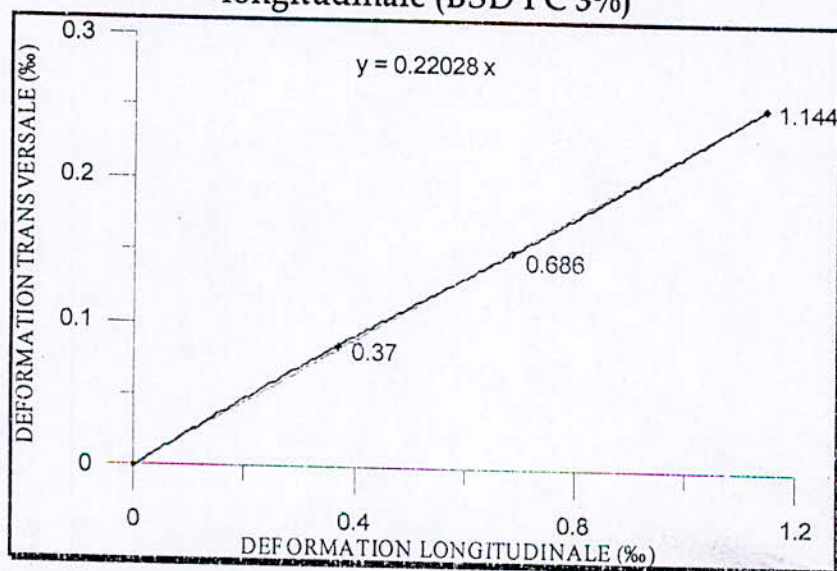
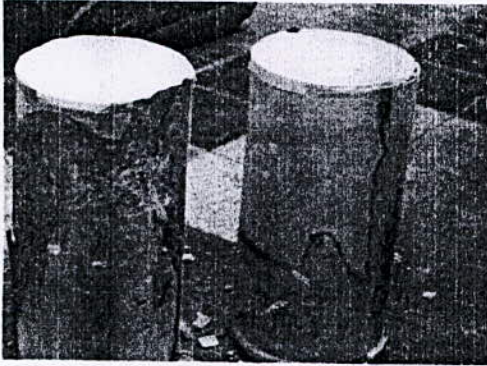


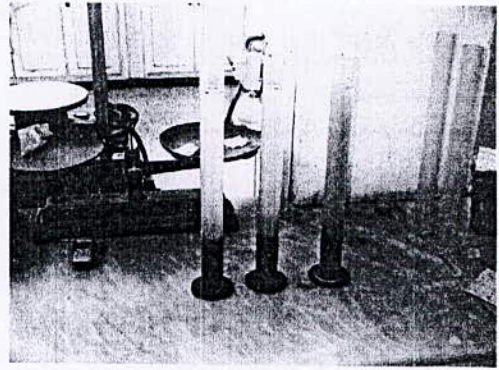
Figure 24 : Courbe déformation transversale en fonction de la déformation longitudinale tronquée (BSD PC 3%)

ANNEXE C

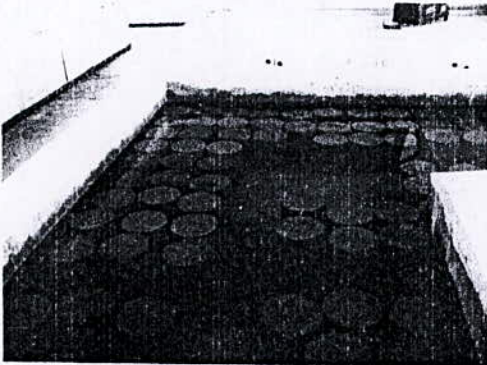




Eprouvette après écrasement



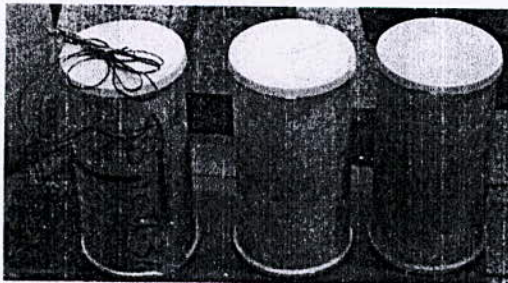
équivalent de sable



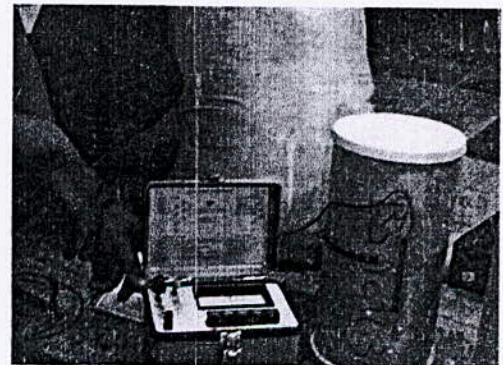
Les éprouvettes dans le bassin



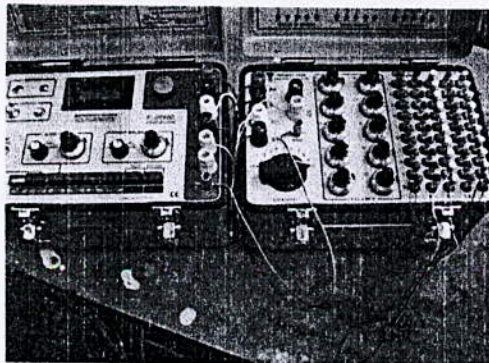
le moule cylindrique



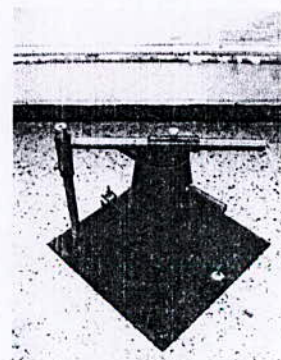
Eprouvette équipée de jauges



testeur de jauges



Pont d'extensométrie



cône d'ABRAM



- [1] SABLOCRETE, (1994), *Béton de sable*, Presse de l'école nationale des ponts et chaussées, Paris, France.
- [2] A.GHERIB, (2003), *Etude d'un béton de sable de dunes pour pistes aéronautiques*, thèse de magistère, ENP, Alger, Algérie.
- [3] R.GUENOUN, (2003), *Etude et formulation d'un béton de sable de dune*, P.F.E, ENP, Alger, Algérie.
- [4] A.A.CHAOUCH, (1993), *Etude des caractéristiques du béton de sable de dunes*, thèse de magistère, ENP, Alger, Algérie.
- [5] A.M. NEVILLE, (2000), *Propriétés des bétons*, édition EYROLLES, Paris, France.
- [6] BENMALEK M, (1992), *contribution à l'étude des bétons de sable dunaire pour éléments de structure*, thèse de magistère, ENP, Alger, Algérie.
- [7] DURIEZ M et ARRAMBIDE J, (1961), *Nouveau traité e matériaux de construction-tome 1*, Edition DUNOD, Paris, France.
- [8] NGUYEN THANH LONG, (1993), *Le Pneusol : Recherches -- Réalisations -- Perspectives*, Thèse de doctorat, INSA de Lyon, France.
- [9] J.J.CHAUVIN, (1990), *le béton de sable*, LRPC, bordeaux, France.



## ملخص:

تتمحور هذه الدراسة التجريبية حول تأثير إضافة المسعوق المطاطي بكميات ضئيلة من 1% إلى 4% بخطوة 1% في خرسانة رمل الكثبان، من أجل هذا قمنا بسلسلة تجارب على تركيبتين مختلفتين، الأولى خرسانة رمل الكثبان مصعقة بالرمل (0/3)، و الثانية مصعقة بالرمل (0/3) و الحصى (3/8). النتائج أثبتت عدم نجاعة خرسانة رمل الكثبان المغيرة بالمسعوق المطاطي من ناحية المقاومة و ثابت المرونة إلا أن لها خصائص إيجابية مثل الليونة و التراص.

الكلمات المفتاحية: الخرسانة الرملية، المسعوق المطاطي، المقاومة، الليونة، التراص، ثابت المرونة.

## Résumé:

Ce travail expérimental a pour but, l'étude de l'influence d'ajout de poudrette de caoutchouc sur le béton de sable de dune. Pour ce faire, on a effectué deux séries d'essais, la première est celle du béton de sable de dunes corrigé par l'ajout de sable concassé (0/3) (non chargé), et la seconde le béton de sable de dunes corrigé par l'ajout de sable concassé (0/3) et le gravillon (3/8) (chargé). Dans chaque série on a introduit la poudrette de caoutchouc de 1% à 4% en pourcentage pondéral, Les résultats obtenus lors de cette étude ont montré la non validité de ces compositions du point de vue résistance et module d'élasticité, mais elles comportent des propriétés positives tel que la maniabilité et la compacité.

Mots clés: béton de sable, poudrette de caoutchouc, résistance, maniabilité, compacité, module d'élasticité.

## Summary:

This experimental study investigates the effects of addition of crumb tyre rubber in sand concrete. For this reasons we had done two experimental on two different formulations, the first is sand concrete corrected with sand (0/3), and the second is sand concrete corrected with sand (0/3) and stone (3/8). The obtained results have shown the invalidity of these formulations concerned resistance and elastic modulus, but they have positive properties like workability and compactness.

Keywords: sand concrete, crumb tyre rubber, resistance, workability, compactness, elastic modulus.